

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE MONTPELLIER SUPAGRO

En Ecologie Fonctionnelle et Sciences Agronomiques

École doctorale GAIA

Unité de recherche UMR SYSTEM

Apports des sciences participatives et des sciences agronomiques à la conception de systèmes agroforestiers complexes innovants

Présentée par Martin Notaro

Le 11/12/2019

Sous la direction de Christian Gary
et l'encadrement d'Olivier Deheuvels

Devant le jury composé de

Marc TCHAMITCHIAN, Directeur de recherche, INRA

Jean-Noël AUBERTOT, Directeur de recherche, INRA

Monika SCHNEIDER, Ingénieure de recherche, FiBL

Sylvaine SIMON, Ingénieure de recherche, INRA

Stéphane de TOURDONNET, Enseignant-chercheur, Montpellier SupAgro

Christian GARY, Directeur de recherche, INRA

Pierre COSTET, Responsable Qualité cacao & Analyse sensorielle, Valrhona

Rapporteur

Rapporteur

Examinatrice

Examinatrice

Président du jury

Directeur de thèse

Invité



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER



THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE MONTPELLIER SUPAGRO

En Ecologie Fonctionnelle et Sciences Agronomiques

École doctorale GAIA

Unité de recherche UMR SYSTEM

Apports des sciences participatives et des sciences agronomiques à la conception de systèmes agroforestiers complexes innovants

Présentée par Martin Notaro

Le 11/12/2019

Sous la direction de Christian Gary
et l'encadrement d'Olivier Deheuvels

Devant le jury composé de

Marc TCHAMITCHIAN, Directeur de recherche, INRA

Jean-Noël AUBERTOT, Directeur de recherche, INRA

Monika SCHNEIDER, Ingénieure de recherche, FiBL

Sylvaine SIMON, Ingénieure de recherche, INRA

Stéphane de TOURDONNET, Enseignant-chercheur, Montpellier SupAgro

Christian GARY, Directeur de recherche, INRA

Pierre COSTET, Responsable Qualité cacao & Analyse sensorielle, Valrhona

Rapporteur

Rapporteur

Examinatrice

Examinatrice

Président du jury

Directeur de thèse

Invité



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER



Avant propos

Cette thèse a été réalisée d'octobre 2016 à octobre 2019 à l'UMR System, dont deux ans en République Dominicaine et un an à Montpellier (quatre premiers et huit derniers mois). Ce travail a été cofinancé par les partenaires industriels du Projet CacaoForest (<http://www.cacaoforest.org/>) qui sont Valrhona, Bjorg Bonnetterre & Cie, Weiss, Révillon et Les Relais Desserts. Sur le terrain le projet a pu être mené à bien grâce à l'appui logistique de nos partenaires locaux qui sont CONACADO, FUNDOPO et Rizek.

Cette thèse a été dirigée par Christian Gary et encadrée par Olivier Deheuvels et a bénéficié des conseils avisés des membres du comité de thèse Raymond Reau, Christophe David, Patrick Jagoret, Philippe Tixier et Pierre Costet.

Article publié dans une revue à comité de lecture

Notaro M., Gary C., Deheuvels O., 2019. Plant diversity and density in cocoa-based agroforestry systems: how farmers' income is affected in the Dominican Republic. *Agroforestry Systems – accepté sous conditions de modifications mineures*.

Communication et poster dans des Congrès

Notaro M., Gary C., Deheuvels O., 2019. Contribution of plant diversity to farmers' income in cocoa-based agroforestry systems. In : Dupraz Christian (ed.), Gosme Marie (ed.), Lawson Gerry (ed.). *4th World Congress on Agroforestry. Book of abstracts*. Montpellier : CIRAD, INRA, p. 442. World Congress on Agroforestry. 4, 2019-05-20/2019-05-22, Montpellier (France).

Notaro M., Gary C., Deheuvels O., 2019. Mapping plant diversity in cocoa-based agroforestry systems to improve overall productivity. In : Dupraz Christian (ed.), Gosme Marie (ed.), Lawson Gerry (ed.). *4th World Congress on Agroforestry. Book of abstracts*. Montpellier : CIRAD, INRA, p. 580. World Congress on Agroforestry. 4, 2019-05-20/2019-05-22, Montpellier (France).

Notaro M., Martinet M., Vaca R., Schloeggel C., Costet P., Gary C., Deheuvels O., 2017. Participatory design of cocoa-based agroforestry systems – a Methodological approach in the Dominican Republic. In : *Proceedings of the first International Symposium on Cocoa Research ISCR 2017*. Lima : ICCO, 10 p.. International Symposium on Cocoa Research & ISCR 2017 : Promoting Advances in Research to Enhance the Profitability of Cocoa Farming. 1, 2017-11-13/2017-11-17, Lima (Pérou). https://www.icco.org/about-us/international-cocoa-agreements/doc_download/3649-participatory-design-of-sustainable-cocoa-based-agroforestry-systems-a

Activités d'encadrement

Formations en statistique descriptive et formation de prise en main du logiciel Excel, et Encadrement de quatre stages de fin d'étude (Ingénieur agroforestiers) de Carlos Collado, Jhon Kinsley Depas, Dufrene Dumovil et Aquino Jean Denis, ayant donné lieu à la rédaction d'un mémoire de fin d'études : « Análisis de la productividad de cacao orgánico y rubros asociados en las fincas de los productores socios de CONACADO en la provincia Duarte, y de FUNDOPO en la provincia San Cristóbal ».

Rédaction d'un guide technique

Co-auteur avec O. Deheuvels du guide technique du Projet CacaoForest en République Dominicaine (PCF-RD) intitulé « Guía técnica y científica para la instalación y el seguimiento de una red experimental participativa de investigaciones agroforestales ».

Remerciements

Une thèse... c'est long et rude ! Mais aussi très riche en rencontres et pleine d'émotions. Je tiens à dire merci aux personnes qui ont compté pour moi au cours de ces trois années.

Je souhaite remercier particulièrement les agriculteurs et agricultrices qui ont accepté de s'impliquer régulièrement dans les ateliers de co-conception, ou tout simplement de répondre à des questions ou à donner un coup de main pour faire des mesures en parcelles.

Je remercie chaleureusement Federico Piña, Joaquin Flores Doñe, Elena de Jesus, Segundo Suero, Apolinar Sanchez, Luca Visquain, Noel Fria, Rafael Doñez Solano, Beatriz Hernandez, Juan Francisco Liriano, Paulino Diroche, Pedro Nival, José Agüero, Francisco de Jesus Reyes, Juan Florentino, Soylo Paula Polanco, Eulogio Arciniega Jesus, Diomedé Henrique Tejada, Soterio Alcantara Trejeda, Altagracia Ramirez Tejada, Alberto Alcantara, Lucrecio Maria Tigrey Guzman, Cristino Brito, Luis Brito, Yolanda Baes Brito, Orlando Gautita Abas, Felicia Puella Autista, Antonio Alcantara, Damian Puella, Otilio Adamis, Florentino Reyes Lugo, Roberto Antonio Santo Perez, Manuel Tibrey, Ramon Tibrey, Cirila Nival Suarez, Caestana Pichado Nival, Daniel Suero Piña, Santo Jimenez, Estanizgao Piñera, Casimiro Upia, Rufino Corporan, Umberto Diroche Amador, Juan José Adame Depos, Eusebio Lopez, Domingo Alexander Valdez, Luis Ernesto, Norberto Frias Diaz, Native Paredes, Felix Manuel Olivo Escolastico, Francisco Morales, Ramona Hernandez, Juan Carlos Hernandez, Melvin Antonio Martes Frias, Juan Isidro Escolastico Mejia, Juan Francisco, Julian Rosario Nuñez, Elpidio Escolastico, Eusebio Lopez, Bernabe Paredes Duran, Cecilio Reyes Tavares, Melanio Martinez Duran.

Aussi, je souhaiterais remercier tous les partenaires locaux au projet, de FUNDOPO, de la CONACADO, de Rizek Cacao, de la Comision Nacional del Cacao, de l'IDIAF, du Ministère d'agriculture et de son Département Cacao. Merci particulièrement à Alberto Piña, Nicolas Gomera, Chamuc Corporan, Daniel Vicioso, Enriqueta, Jairon Almonte qui m'ont accompagné tout au long de mes travaux de terrain et toujours présents pour répondre à mes interrogations. De même je souhaite remercier Yony Molina, Marisol Ventura Lopez, Alejandro Nuñez, Omar Batista, Juan Luis Paredes. Je remercie aussi le CEDAF qui m'a offert un espace de travail dans leurs locaux à Saint-Domingue pour avancer sur mes analyses et ma rédaction : un grand merci à Janina Segura, et à l'ensemble du personnel.

Je tire mon chapeau à Carlos Collado, Jhon Kinsley Depas, Dufrene Dumovil et Aquino Jean Denis, étudiants de la UNEV pour avoir énormément contribué à la collecte de données en parcelles et pour avoir réussi avec brio leur stage de fin d'étude.

Je remercie le projet CacaoForest et ses différents partenaires : Earthworm, Valrhona, Relais Dessert, Weiss, Révillon, Bjorg Bonnetterre & Cie. Spécialement Pierre Costet pour être l'instigateur de ce formidable projet ainsi que Maria Rey de Arce, Alexandre Haslé de Baral et Thomas Emery qui travaillent, ou ont travaillé, d'arrache-pied à l'avancement du projet sur place.

Je suis très reconnaissant envers le CIRAD, surtout mes collègues proches dont mes encadrants. A Sandrine pour les formalités administratives (et y'avait du boulot !), Olivier particulièrement pour ton coup de main précieux sur la rédaction de mon premier article de thèse, et Christian pour ton aide psychologique et ton suivi scientifique sans faille au cours des 6 derniers mois de thèse.

Enfin je remercie mes amis dominicains, montpelliérains et franc-comtois pour leurs attentions, leurs appels, leurs messages... Et même des chouettes vacances en République Dominicaine avec certains. Un grand merci à ma famille, toujours prête pour remonter le moral lorsqu'il est dans les chaussettes, et à Joel qui m'a soutenu et toujours encouragé pour donner le meilleur de moi-même dans mon travail.

Table des matières

CHAPITRE I. INTRODUCTION **9**

I.1. DES EXIGENCES SOCIETALES POUR UNE AGRICULTURE JUSTE ET DURABLE	9
I.2. LA CONCEPTION PARTICIPATIVE : UN PROCESSUS FACILITANT L'EVOLUTION DES PRATIQUES	10
I.2.1. De la conception d'innovations conventionnelle à la conception participative	10
I.2.2. Evolution des approches et méthodes de conception participative	11
I.3. LA CACAOCULTURE : UNE PLURALITE DE MODES DE PRODUCTION DU CACAO	12
I.3.1. Origine et évolution de la production mondiale du cacao	12
I.3.2. Phénologie et physiologie du cacaoyer	12
I.3.3. Les systèmes de culture du cacaoyer observés autour du globe et leurs performances agroéconomiques	13
I.3.4. La diversité des associations d'espèces comme potentiel agroécologique des SAF	17
I.4. LE CONTEXTE EN REPUBLIQUE DOMINICAINE	18
I.4.1. Evolution de la production nationale	18
I.4.2. La cacaoculture dominicaine : des systèmes agroforestiers	18
I.4.3. La situation socioéconomique des producteurs et de leur famille	19
I.5. PROBLEMATIQUE, QUESTIONS DE RECHERCHE ET HYPOTHESES	20
I.6. MATERIELS ET METHODES	21
I.6.1. Le contexte de réalisation de la thèse	21
I.6.2. Choix des zones d'étude	21
I.6.3. Diagnostic agronomique partiel pour caractériser les performances agroéconomiques des SAF dominicains et leurs déterminants	22
I.6.3.a. Approche mixte	22
I.6.3.b. Approche <i>in situ</i>	22
I.6.3.c. Les variables clés du diagnostic agronomique partiel	23
I.6.4. La démarche de co-conception	24
I.6.5. Dispositif de recherche général	25

CHAPITRE II. PLANT DIVERSITY AND DENSITY IN COCOA-BASED AGROFORESTRY SYSTEMS: HOW FARMERS' INCOME IS AFFECTED IN THE DOMINICAN REPUBLIC **26**

II.1. INTRODUCTION	26
II.2. MATERIAL AND METHODS	27
II.2.1. Study sites	27
II.2.2. Selection of farmers and cocoa-based AFS fields	28
II.2.3. The typology of cocoa-based AFS based on their structure	29
II.2.4. Assessment of economic performance	29
II.2.5. Statistical analyses	30
II.3. RESULTS	30
II.3.1. Typology of cocoa-based AFS based on their structure	30
II.3.2. Yields and economic performance in the three types of cocoa-based AFS	33
II.3.2.a. The products harvested and income generated by the three types of cocoa-based AFS	33
II.3.2.b. Determinants of associated plant diversity and economic performances	34

II.3.3. Relationships between density, diversity and global income	35
II.4. DISCUSSION	36
II.4.1. Cocoa-based AFS with contrasted structural patterns	36
II.4.2. Yield and economic performances of cocoa-based AFS related to their structure	37
II.4.3. Need for farm-scale studies	39
II.5. CONCLUSION AND PERSPECTIVES	39
II.6. UN BESOIN PRESSANT D'INNOVER POUR SOLUTIONNER	40

CHAPITRE III. ELABORATION ET TEST D'UNE METHODE PARTICIPATIVE INNOVANTE DE CONCEPTION DE SAF AGROECOLOGIQUES COMPLEXES A BASE DE CACAOYERS

III.1. INTRODUCTION	42
III.2. MATERIEL ET METHODES	43
III.2.1. Localisation	43
III.2.2. Choix des participants	44
III.2.3. Les différentes étapes du processus de conception participative	44
III.2.4. Objectifs	46
III.2.5. Les leviers agroécologiques au cœur de la co-conception	46
III.2.6. Une méthode participative de sélection des variétés de cacaoyers et des espèces associées	47
III.2.7. Choix des densités de plantation et de la disposition des espèces dans l'espace	48
III.2.8. La trajectoire économique des prototypes co-conçus	49
III.2.9. Présentation et échange entre groupes de co-conception	49
III.3. RESULTATS	50
III.3.1. Les états souhaités des SAF (structure) et les fonctions agroécologiques correspondantes	50
III.3.2. La composante cacaoyer (variétés choisies)	53
III.3.3. La composante plantes associées (espèces et variétés choisies)	54
III.3.4. La structure des SAF	55
III.3.5. Evaluation des performances économiques des quatre prototypes co-conçus	60
III.4. DISCUSSION ET PERSPECTIVES	61
III.4.1. Une méthode simple et originale de conception pour des systèmes de culture plurispécifiques complexes	61
III.4.2. Une méthode générique innovante mais en manque d'adaptabilité	62
III.4.3. Des performances agro-économiques à évaluer <i>in situ</i>	63
III.5. CONCLUSION	64

CHAPITRE IV. INFLUENCE DE LA DENSITE, DE LA DISTRIBUTION SPATIALE ET DE CERTAINS TRAITS MORPHOLOGIQUES DES CACAOYERS ET DES ESPECES ASSOCIEES DANS DES SYSTEMES AGROFORESTIERS SUR LA PRODUCTIVITE DE CES DIFFERENTES CULTURES

IV.1. INTRODUCTION	65
IV.2. MATERIEL & METHODES	66
IV.2.1. Localisation	66
IV.2.2. Conditions pédoclimatiques	66
IV.2.3. Les dispositifs expérimentaux	67
IV.2.4. Estimation des performances agro-économiques	68
IV.2.5. Analyses statistiques	68

IV.3. RESULTATS	70
IV.3.1. Densité et diversité des espèces cultivées des SAF et leur influence sur la performance économique à l'échelle parcellaire	70
IV.3.2. Performances agroéconomiques des espèces cultivées : mesures de la productivité agronomique et de la valeur économique à l'échelle de la plante et du groupe d'espèces	77
IV.3.3. Déterminants de la performance agroéconomique	79
IV.4. DISCUSSION	81
IV.4.1. L'intérêt économique de densifier et diversifier les cultures associées	81
IV.4.2. Un rendement déterminé par des traits intrinsèques plus que ceux des plantes voisines	82
IV.5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	83

CHAPITRE V. CONCEPTION ASSISTEE PAR UNE ANALYSE STATISTIQUE ET COMPARAISON DE DEUX PROTOTYPES ISSUS DE CETTE METHODE AVEC LES QUATRE PROTOTYPES CO-CONÇUS

84

V.1. INTRODUCTION	84
V.2. MATERIEL ET METHODE	85
V.3. RESULTATS	86
V.3.1. Le cheminement de conception à partir des résultats de l'analyse statistique	87
V.3.1.a. Densité et répartition spatiale des cacaoyers	87
V.3.1.b. Densité des espèces associées	87
V.3.1.c. Répartition spatiale des espèces associées	88
V.3.2. Comparaison de la structure des prototypes entre les deux approches de conception et de leur répercussion sur la productivité des cacaoyers	89
V.4. DISCUSSION : DES DIFFERENCES STRUCTURELLES POUVANT IMPACTER LES PERFORMANCES AGROECONOMIQUES	90
V.4.1. Faut-il privilégier une densification ou un éclaircissage ?	90
V.4.2. Des dispositions de cultures associées plus risquées pour les prototypes co-conçus	92
V.4.3. Adaptation nécessaire de la méthode d'évaluation <i>ex ante</i> des performances agroéconomiques	92
V.5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	93

CHAPITRE VI. DISCUSSION GENERALE

94

VI.1. QUID DE LA PROVISION DE SERVICES ECOSYSTEMIQUES PAR LES SAF COMPLEXES ETUDIES ?	94
VI.1.1. Liens entre structure des SAF et services de support	94
VI.1.2. Liens entre structure des SAF et services de régulation	95
VI.1.3. Les services écosystémiques dépendant des pratiques agricoles	95
VI.2. DES STRUCTURES QUI AUGMENTENT LA PRODUCTIVITE GLOBALE DES SAF MAIS QU'EN EST-IL DE LA PROFITABILITE ECONOMIQUE ?	96
VI.3. PERSPECTIVES DE LA PARTIE RECHERCHE DU PROJET CACAOFOREST	97

CHAPITRE VII. CONCLUSION GENERALE

100

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

102

ANNEXES

117

Liste des Figures

Figure 1. Deux modes de conception d'innovation et de leur diffusion en agriculture, l'une "conventionnelle/ ordinaire" (A), l'autre plus "collective/participative" (B)-----	10
Figure 2. Les différentes zones de production et de consommation de cacao dans le monde (A) et évolution de la production mondiale au cours des 50 dernières années (B)-----	12
Figure 3. Les différentes phases du cycle de vie d'un cacaoyer -----	13
Figure 4. Représentation schématique d'un SAF avec identification de trois strates-----	17
Figure 5. Représentation schématique des effets de facilitation ou de compétition suivant certains facteurs (en italique) entre les feuillages et les systèmes racinaires de deux espèces végétales différentes -----	17
Figure 6. Situation géographique de la République Dominicaine dans les Caraïbes et schématisation des principales données sur la culture du cacao du pays -----	18
Figure 7. Représentation schématique d'un SAF à base de cacaoyers dominicain-----	19
Figure 8. Schématisation de la question de recherche liée à l'hypothèse 1-----	20
Figure 9. Schématisation de la question de recherche liée à l'hypothèse 2-----	20
Figure 10. Schématisation de la question de recherche liée à l'hypothèse 3-----	20
Figure 11. Carte de la République Dominicaine et localisation des trois provinces d'étude : El Seibo, Duarte et San Cristobal-----	21
Figure 12. Synthèse schématique des différentes composantes des SAF qui sont étudiées dans la thèse, dans les deux disciplines de l'agronomie (en vert) et de l'économie (en orange)-----	23
Figure 13. Schéma récapitulatif des chapitres de la thèse, précisant la localisation, l'échantillonnage, et les liaisons entre ces chapitres -----	25
Figure 14. Location of the 140 cocoa-based AFS sampled in 3 main cocoa production areas) -----	27
Figure 15. Meteorological data. A) average minimum temperatures (blue line) and maximum (red line) and B) average precipitation in the three study areas for the period 1981 to 2010 -----	28
Figure 16. Principal component analysis of nine variables characterizing the AFS structure -----	30
Figure 17. Typology based on the 140 cocoa-based AFS identified in three main production regions- -----	32
Figure 18. Contribution to the OPI (A) and VDC (B) incomes from the main products harvested -----	33
Figure 19. Bargraph representing sales and domestic consumption value (VDC) in the three types of cocoa-based AFS -----	34
Figure 20. Global income GI (CI + OPI + VDC) generated by a sample of 140 cocoa-based AFS according to the species richness per 1,000 m ² (A) and the density per ha (B) of plants associated with cacao trees -----	36
Figure 21. Changes in income along a gradient of density and diversity of plants associated with cocoa trees in AFS-----	38
Figure 22. Carte de la République Dominicaine et délimitation de deux provinces sélectionnées (en rouge)-----	43
Figure 23. Atelier de schématisation des prototypes de SAF cacaoyers, permettant de fixer les espèces végétales retenues ainsi que leur disposition dans l'espace-----	48
Figure 24. Représentation schématique du prototype PSC sur 1/16ème d'ha -----	56
Figure 25. Représentation schématique du prototype TSC sur 1/16ème d'ha -----	57
Figure 26. Représentation schématique du prototype PD sur 1/16ème d'ha -----	58
Figure 27. Représentation schématique du prototype TD sur 1/16ème d'ha -----	59
Figure 28. Projections économiques des quatre prototypes co-conçus sur 20 ans-----	60
Figure 29. Schéma représentatif d'une portion de dispositif pour comprendre l'analyse effectuée avec le modèle mixte en fonction de la distance-----	69

Figure 30. Cartes schématiques détaillant la disposition des plantes suivant leur groupe dans chacun des 34 dispositifs rectangulaires de 1000m ² -----	73
Figure 31. Relations entre le revenu tiré du cacao (Cocoa Income CI, en brun) et la valeur économique des produits des plantes associées (economic value of other Product Income VOP, en bleu).-----	74
Figure 32. Histogramme des revenus tirés du cacao (CI) et des cultures associées (OPI) et de l'auto-consommation (VDC) cumulés pour les trois types formés suivant un gradient de densité d'arbres associés-----	75
Figure 33. Rendement moyen par plante productive (kg) mesuré ou estimé dans l'ensemble des dispositifs suivant un ordre décroissant-----	77
Figure 34. Matrice des corrélations entre le rendement (kg.plante-1) de chaque groupe de culture productive (CACAO, FRUIT, CITRUS, MUSA, VIV) et des variables (i) économique, (ii) de caractéristiques intrinsèques, (iii) concernant la plante associée la plus proche, (iv) concernant le cacaoyer le plus proche-----	79
Figure 35. Effet du nombre de plantes de chaque groupe dans le voisinage du cacaoyer (de 1 à 5 m de rayon) sur la productivité du cacaoyer -----	80
Figure 36. Schémas de dispositifs de plantation sur 1/16ème d'ha pour les prototypes matures co-conçus (PSC, TSC, PD et TD) et élaborés à partir des analyses statistiques du Chapitre IV (P1ch4 et P2ch4).-----	86
Figure 37. Tableau récapitulatif des effets de chacun des sept groupes d'espèces cultivées sur la productivité du cacaoyer (à gauche) et transcription de la règle de décision des distances entre le cacaoyer et les groupes d'espèces en schéma (à droite)-----	87
Figure 38. Schéma explicatif du raisonnement de conception à partir de résultats d'analyses statistiques suivant la chronologie des étapes décrites dans la partie 3.1 (a,b, c)-----	88
Figure 39. Motifs de disposition spatiale récurrente parmi les quatre prototypes co-conçus-----	90
Figure 40. GI (Global Income) avec dissociation du CI (Cocoa Income) et du VOP (economic Value of Other Products) en fonction d'une classification combinant classes d'âge des cacaoyer (C jeune, C mature, C ancien) et densités des arbres associés (dAA faible, dAA intermédiaire, dAA élevée)-----	91
Figure 41. Relations entre la part de la surface terrière du peuplement cacao et l'âge moyen des cacaoyers en fonction du rendement cacao sur nos 34 dispositifs étudiés -----	91
Figure 42. Schéma conceptuel du réseau expérimental de prototypes de SAF cacaoyers -----	97
Figure 43. Schéma du motif fréquemment retrouvé dans les prototypes co-conçus -----	99

Liste des Tableaux

Tableau 1. Densité et diversité des différentes cultures (cacaoyers et plantes associées) et les rendements correspondants dans les SAF cacao autour du globe -----	15
Tableau 2. Principales variables des diagnostics agronomiques conduits dans la thèse et leurs unités -----	23
Table 3. Variables collected in interviews (I) led with 140 cocoa farmers or measured (M) on 1,000m ² plots of 140 cocoa-based AFS fields -----	29
Table 4. Comparison of three cocoa-based AFS based on the average values of nine AFS structural variables and performed with permutation Student's t tests -----	31
Table 5. Decreasing density (plants.ha ⁻¹) of the associated species in the three cocoa-based AFS types -----	32
Table 6. Variables describing the economic performance of each cocoa-based AFS type -----	35
Tableau 7. Variables explicatives du niveau de pauvreté de chaque type -----	40
Tableau 8. Tableau récapitulatif des différentes étapes de conception, de leurs enjeux et des supports utilisés au cours des ateliers -----	45
Tableau 9. Résumé des états souhaités des différentes composantes des SAF suivant différentes strates et des fonctions associées pour la zone de Duarte -----	50
Tableau 10. Critères utilisés pour la sélection des variétés de cacaoyers et des espèces végétales associées -----	52
Tableau 11. Résultats de la méthode de Sheil (nombre de points rapporté à un total de 50 par groupe) appliquée aux critères de sélection des variétés de cacaoyers pour les deux groupes des deux zones. 53	
Tableau 12. Résultats de la méthode de Sheil (nombre de points rapporté à un total de 50 par groupe) appliquée au poids d'importance Pi donné à chaque critère de sélection des espèces associées aux cacaoyers chez les deux groupes des deux zones -----	54
Tableau 13. Récapitulatif des espèces végétales sélectionnées et de leur densité de plantation initiale (de 0 à 7 ans) et finale (prototype d'au moins 7 ans) pour le prototype du groupe PSC sur 1/16 ^{ème} d'ha. -----	56
Tableau 14. Récapitulatif des espèces végétales sélectionnées et de leur densité de plantation initiale (de 0 à 7 ans) et finale (prototype d'au moins 7 ans) pour le prototype TSC sur 1/16 ^{ème} d'ha. -----	57
Tableau 15. Récapitulatif des espèces végétales sélectionnées et de leur densité de plantation initiale (de 0 à 7 ans) et finale (prototype d'au moins 7 ans) pour le prototype PD sur 1/16 ^{ème} d'ha. -----	58
Tableau 16. Récapitulatif des espèces végétales sélectionnées et de leur densité de plantation initiale (de 0 à 7 ans) et finale (prototype d'au moins 7 ans) pour le prototype TD sur 1/16 ^{ème} d'ha. -----	59
Tableau 17. Valeurs moyennes de certaines variables pédologiques (\pm ET) pour les deux régions de Duarte et San Cristobal -----	66
Tableau 18. Variables mesurées pour toutes les plantes sur les 34 placettes d'étude -----	68
Tableau 19. Effectif et densité des cacaoyers et des cultures associées, répartis en trois strates et sept groupes de cultures dans les 34 dispositifs des régions de Duarte et San Cristobal -----	71
Tableau 20. Caractéristiques de chaque type de SAF : CI, VOP, d, S et Age -----	76
Tableau 21. Présentation des effectifs d'espèces et de plantes suivant leur nombre total et leur nombre en production ainsi que le chiffre d'affaire moyen pour chacun des 7 groupes de cultures ---	78
Tableau 22. Comparaison des caractéristiques moyennes observées dans les SAF existants (décrits dans les ChI et ChIII), dans les quatre prototypes co-conçus (PSC, PD, TSC et TD), et dans les deux prototypes dont la conception est issue de l'analyse statistique (P1ch4 et P2ch4) -----	89

Liste des sigles et abréviations

SAF : Système agroforestier

C : Cacaoyer

PA : Culture associée

AA : Arbre associé

PNL : Plante associée non ligneuse

d : densité (nombre d'individus par unité de surface)

S : richesse spécifique (nombre d'espèces végétales différentes sur 1000m²)

D : Diversité et densité

Dist : distance (m)

CI : Cocoa Income → Chiffre d'affaire cacao (US\$ par unité de surface)

OPI : Chiffre d'affaire lié à la vente d'autres produits que le cacao (Other Products Income)

VDC : Valeur économique des produits autoconsommés (Value of Domestic Consumption)

VOP : Valeur économique des autres produits que le cacao (Value of Other Products)

GI : Valeur économique de la production totale soit CI + VOP (Global Income)

H : Hauteur (m)

St : Surface terrière (m²)

CACAO : peuplement cacaoyers

VIV : peuplement de cultures vivrières

MUSA : peuplement de bananiers (Musacées)

BOIS : peuplement d'arbres à bois

FIXN : peuplement d'arbres fixateurs d'azote (Fabacées)

CITRUS : peuplement d'agrumes

FRUIT : peuplement d'arbres fruitiers (autres qu'agrumes)

LAI : Indice de Surface Foliaire (sans dimension)

SLA : Surface Foliaire Spécifique (m².kg⁻¹)

CHAPITRE I. INTRODUCTION

I.1. DES EXIGENCES SOCIETALES POUR UNE AGRICULTURE JUSTE ET DURABLE

Au sortir de la Seconde guerre mondiale, l'Europe est dévastée et les systèmes de production agricole qui la caractérisent sont dépassés. Des périodes de disettes alimentaires voire de famines ont jalonné ces années de guerre, et les pouvoirs politiques aidés par la communauté scientifique vont faire évoluer assez rapidement l'agriculture pour que cela ne puisse plus se reproduire. En Europe comme dans d'autres régions du monde, des modifications importantes des pratiques agricoles voient le jour en particulier en matière de fertilisation, d'irrigation et de protection des cultures, avec des exploitations agricoles dont les surfaces cultivées augmentent. Les progrès techniques liés à l'ère industrielle ainsi qu'aux guerres, dans les domaines de la chimie (pesticides et fertilisants de synthèse) et du machinisme agricoles (par exemple la motorisation des pratiques agricoles, les systèmes automatiques d'irrigation par aspersion, etc.) vont permettre aux agricultures des pays du Nord de fournir des quantités suffisantes de produits alimentaires à leur population. Dans les pays du Sud, ces progrès techniques ont été portés par la Révolution verte. Mais malgré une augmentation considérable des rendements, les agriculteurs tirent souvent des revenus médiocres de leur activité, en comparaison avec d'autres secteurs professionnels, sauf quand sont mises en place de politiques publiques de soutien comme la Politique agricole commune (1962) de l'Union Européenne (Mazoyer and Roudart, 1997; Bureau and Thoyer, 2014).

La notion de développement durable apparaît dans les années 1980. Ses fondements remettent en question les modes de production agricole intensifs, particulièrement ceux des pays industrialisés ou bien ceux issus de la Révolution verte. Certes, les niveaux de rendement atteints par ces systèmes de production sont élevés, mais leurs impacts sur le fonctionnement des écosystèmes cultivés sur le long terme sont jugés inquiétants par cette communauté scientifique : les sols sont dégradés, la biodiversité faiblit, etc. (Tilman *et al.*, 2002). L'ONU commande en 2000 une étude afin d'évaluer les conséquences de l'activité humaine sur les écosystèmes. Les résultats mettent en évidence la diminution de fourniture de certains services écosystémiques pourtant essentiels pour la durabilité des écosystèmes, souvent à cause des activités humaines dont l'agriculture (MEA, 2005). Apparaît alors un nouvel enjeu agricole, celui du maintien de services « environnementaux » comme la qualité de l'eau, la limitation de l'érosion, le recyclage des nutriments du sol, etc. (Fischer *et al.*, 2007). Mais la transition de l'agriculture intensive vers des modes de production plus respectueux de l'environnement, aussi appelée agriculture « écologiquement intensive », n'est pas si évidente (Bonny, 2011). En effet, un phénomène de trade-off est observé entre productivité et services « environnementaux » (Zhang *et al.*, 2007; Kremen and Miles, 2012).

Avec des capacités d'investissement faibles, les agriculteurs des pays du Sud essayent d'améliorer les rendements des cultures et de diminuer les coûts de production afin d'améliorer les conditions de vie de leur famille. Quand les finances le permettent, ils ont accès à des produits phytosanitaires et à des herbicides, qui dégradent l'environnement sans pour autant améliorer significativement leur niveau de vie. Dans ces pays, la pauvreté touche particulièrement les ménages agricoles et a pour conséquence un exode rural important. Pour les agricultures du Sud, où les agriculteurs sont rarement subventionnés pour vivre correctement de leur travail, c'est donc une double problématique qui doit être résolue : celle d'une meilleure rémunération tout en préservant l'environnement (Robertson and Swinton, 2005; McIntyre *et al.*, 2009). Actuellement, un des enjeux majeurs du secteur agricole à une échelle globale est de faire émerger des systèmes de production durables, à la fois du point de vue environnemental et du point de vue économique et social (Griffon, 2011).

I.2. LA CONCEPTION PARTICIPATIVE : UN PROCESSUS FACILITANT L'ÉVOLUTION DES PRATIQUES

I.2.1. De la conception d'innovations conventionnelle à la conception participative

L'agriculture est un domaine très technique, qui a toujours évolué en fonction des besoins des sociétés et des objectifs des agriculteurs. Pour ce faire, la conception d'innovations agricoles est nécessaire. L'innovation peut-être le fruit de travaux conduits par l'agriculteur lui-même, par une communauté d'agriculteurs ou par des agriculteurs en relation avec des professionnels d'autres corps de métier (conseil agricole, agrofourniture, etc.). Au XX^{ème} siècle, avec le développement de l'industrie (intrants, matériel végétal, machinisme, etc.) et d'institutions de recherche agronomique et d'encadrement technique, le processus communément observé correspondait à un transfert linéaire de l'innovation dit « top-down » (partie A de la Figure 1). La recherche se concentrait déjà sur la mise au point d'innovations pour la durabilité des systèmes agricoles, selon plusieurs modalités. Le cadre d'analyse ESR « Efficience-Substitution-Reconception » distingue des évolutions consistant à optimiser le système de culture existant, ou à substituer un levier technique par un autre, ou bien à repenser l'ensemble du système de culture (Hill and MacRae, 1996). Mais les agriculteurs ne sont pas nécessairement associés à la production de ces innovations. Pourtant ce sont les principaux acteurs des changements agricoles et ils ont des connaissances expertes diverses qu'il est utile de prendre en compte dans le processus de conception (Cerdán *et al.*, 2012; Cristofari *et al.*, 2018). Depuis quelques décennies, un processus d'innovation plus inclusif, dans lequel des acteurs différents des filières agricoles interagissent et innovent collectivement, a émergé (partie B de la Figure 1). Ce deuxième processus est aujourd'hui communément défini comme une démarche de conception participative.

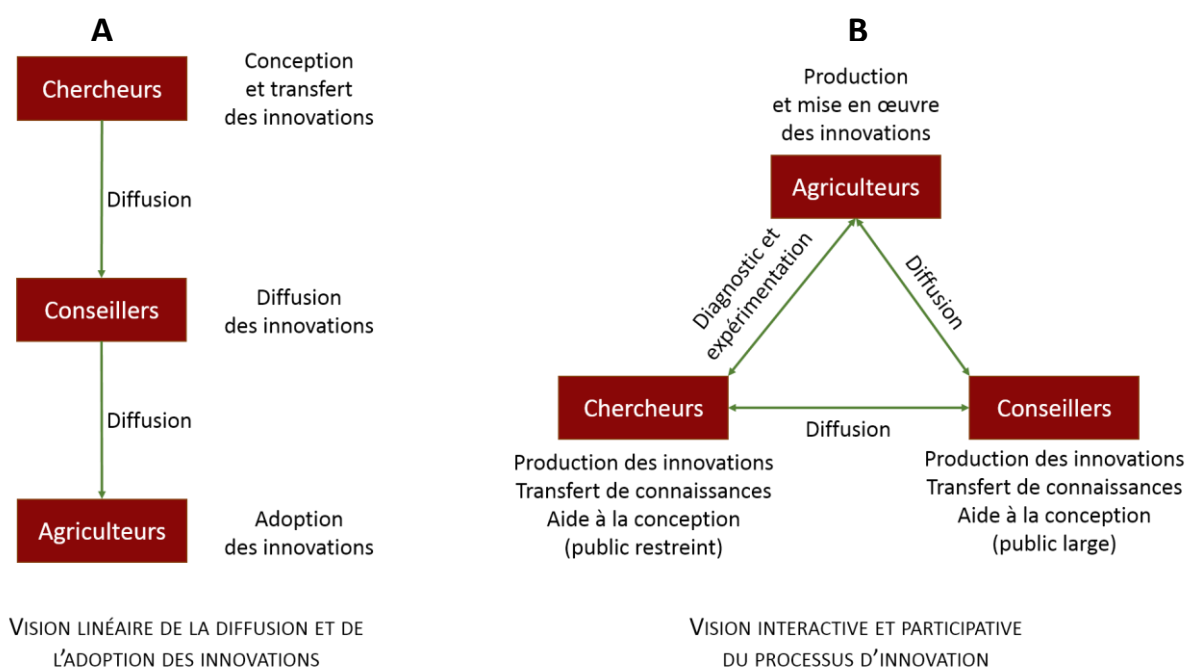


Figure 1. Deux modes de conception d'innovation et de leur diffusion en agriculture, l'une "conventionnelle/ordinaire" (A), l'autre plus "collective/participative" (B) (Source : Le Gal 2011).

Cette démarche participative a été formalisée à partir des travaux de Vereijken (1998) qui a décrit ses travaux de « prototypage », méthode utilisée pour concevoir des prototypes de systèmes de culture, les tester, les améliorer et les diffuser. En résumé, le prototypage se fait en suivant cinq grandes étapes : (1) hiérarchisation des objectifs à atteindre par différents acteurs séparément (ONG,

agriculteurs, techniciens, chercheurs), (2) traduction de ces objectifs en indicateurs quantifiables pour établir la méthode d'évaluation multi-objectifs, (3) conception d'un prototype théorique rassemblant des pratiques agricoles jugées pertinentes pour atteindre les objectifs, (4) expérimentation en parcelles et adaptations éventuelles jusqu'à ce que le prototype soit conforme aux objectifs quantifiés souhaités, (5) dissémination à grande échelle des prototypes via le développement agricole. L'approche de prototypage de Vereijken s'apparente à la conception « *step by step* » (Meynard *et al.*, 2012), dont le but est d'organiser une transition progressive vers des systèmes de culture innovants après avoir expérimenté et validé en conditions réelles les innovations les unes après les autres (Lançon *et al.*, 2007; Husson *et al.*, 2015; Vall *et al.*, 2016). Cette méthode a depuis évolué pour permettre une exploration plus large de possibilités d'innovations (Reau *et al.*, 2012).

1.2.2. Evolution des approches et méthodes de conception participative

Aujourd'hui, la conception participative de systèmes agricoles revêt de nombreuses formes suivant la problématique traitée (Berthet *et al.*, 2015). Différents publics peuvent y prendre part, parmi lesquels des agriculteurs, des conseillers d'instituts techniques, des chercheurs, des industriels voire même des représentants politiques (Le Gal *et al.*, 2011) et cela tout au long du processus ou à des étapes données. Originellement utilisée dans des contextes industriels, la méthode « KCP » (Hatchuel and Weil, 2008) qui enchaîne des phases de partage (1) de connaissances, (2) de concepts et (3) de propositions, a été adaptée à l'innovation agricole. Pour accélérer et enrichir le processus d'innovation, des méthodes de conception dites « *de novo* » permettent d'ouvrir le champ des possibles, où les modifications à apporter sont majeures et supposent souvent des techniques très éloignées de celles habituellement utilisées (Reau and Doré, 2008b). Des méthodes telles que la conception interactive réflexive (RIO) sont élaborées pour faire évoluer le système de production et de consommation en intégrant des dimensions sociotechniques et organisationnelles, quand l'innovation technologique n'est pas suffisante pour résoudre les problèmes (Bos *et al.*, 2009).

Avec des outils numériques de plus en plus performants et facilement mobilisables, la co-conception peut maintenant s'appuyer sur de la modélisation permettant d'évaluer *ex ante* les systèmes de culture innovants imaginés pour savoir s'ils répondent ou non aux objectifs fixés. Il peut s'agir de méthodes d'évaluation multicritère telles que MASC, CRITER ou DexiPM (Sadok *et al.*, 2009; Pelzer *et al.*, 2012; Reau *et al.*, 2012) ou bien de modélisations mathématiques du fonctionnement d'écosystèmes et de calcul d'indicateurs (Keating *et al.*, 2003; Janssen *et al.*, 2010) qui permettent d'assister le processus de co-conception et de sélectionner les pratiques les plus pertinentes par rapport aux objectifs fixés (Bergez *et al.*, 2010; Meylan *et al.*, 2013).

Les méthodes de conception changent aussi avec l'échelle d'approche de la problématique. En effet, celle-ci peut porter sur des objets (ressources ou services) individuels ou partagés, avec des objectifs de diminution, d'accroissement ou de meilleure régulation de ces objets à l'échelle d'un territoire, d'une région, d'une commune, d'une exploitation agricole, ou même de la parcelle agricole. La modélisation d'accompagnement (ComMod) est une approche de modélisation participative qui engage différents types d'acteurs impliqués dans l'utilisation et donc la gestion d'une même ressource pour la résolution de conflits (Barreteau, 2003). Cette méthode s'appuie sur l'utilisation de jeux sérieux, comme des jeux de rôle prenant forme autour de représentations schématiques des paysages agricoles et des ressources en question (Bousquet *et al.*, 2007). D'autres jeux sérieux de simulations existent aussi à des échelles moindres, comme le Rami Fourrager pour concevoir des systèmes agricoles durables à base d'élevage (Martin *et al.*, 2011).

I.3. LA CACAOCULTURE : UNE PLURALITE DE MODES DE PRODUCTION DU CACAO

I.3.1. Origine et évolution de la production mondiale du cacao

Avant d'être domestiqué et cultivé par l'Homme, le cacaoyer poussait sous la canopée des grands arbres de la forêt primaire d'Amazonie (Motamayor *et al.*, 2008), atteignant jusqu'à 15 mètres de hauteur. C'est pourquoi le cacaoyer est dit ombrophile. Les premières traces de domestication se trouvent dans la civilisation Maya (Motamayor *et al.*, 2002), qui se servait des fèves de cacao comme monnaie d'échange ou les transformait en boisson. Plus tard, les fèves de cacao ont été intégrées à la préparation de certains plats en Amérique Centrale, particulièrement au Mexique (sauce Mole par exemple). Les colonies installées dans les Caraïbes à partir du XVI^{ème} siècle produisaient principalement de la canne à sucre, même si la culture du caféier ou du cacaoyer a progressivement pris de l'ampleur, du fait de l'engouement des consommateurs européens. Avec l'ère industrielle et les prémices de la mondialisation, la cacaoculture s'est exportée vers d'autres continents (Barel, 2016).

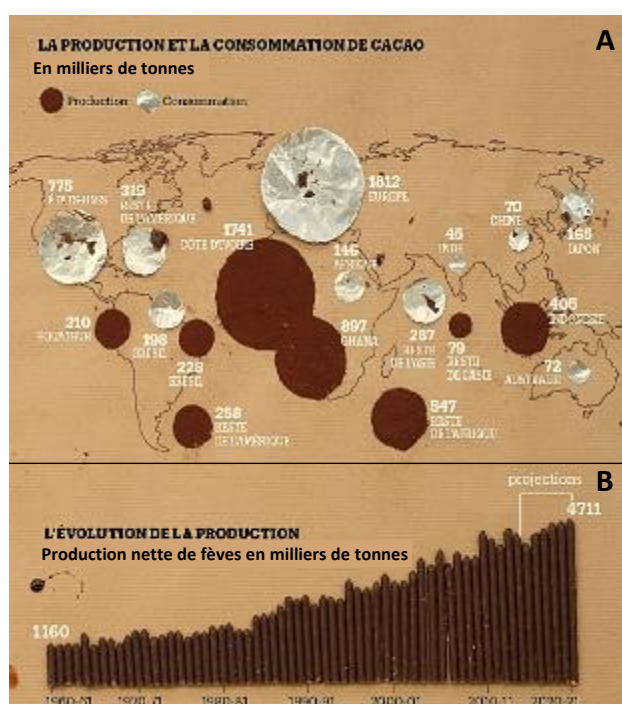


Figure 2. Les différentes zones de production et de consommation de cacao dans le monde (A) et évolution de la production mondiale au cours des 50 dernières années (B) (Source : infographie du journal Libération du 28/10/2016 créée à partir des données du Cocoa Barometer 2015 de l'ICCO)

Aujourd'hui, la production mondiale de cacao est en majorité africaine (73%), devant l'Amérique latine (17%) et l'Asie/Océanie (10%) (ICCO, 2016). En 50 ans, la production de cacao n'a cessé de croître, passant de 1,3 Mt dans les années 1960 à 4,36 Mt (Figure 2) en 2015 (ICCO, 2016; FAOSTAT, 2018). Dans le même temps, la consommation s'est également accrue, du fait notamment de l'augmentation du niveau de vie dans les pays émergents (Jagoret *et al.*, 2014a). Si cette tendance se poursuit, les prévisionnistes annoncent qu'à l'horizon 2030 il faudra un million de tonnes supplémentaires (soit ≈ 5 Mt au total) pour satisfaire la demande mondiale (Jagoret *et al.*, 2014a). Par ailleurs, le ratio consommation/ stocks est passé de 0,3 en 1990 à 0,64 aujourd'hui (ICCO, 2016), indiquant que la demande croît plus vite que l'offre. Dans ce contexte, l'intensification de la production de cacao est devenue un enjeu majeur pour l'ensemble de la filière cacao, de la production à la transformation.

I.3.2. Phénologie et physiologie du cacaoyer

Le cacaoyer est une plante pérenne qui peut se développer par multiplication sexuée ou asexuée (Figure 3). Dans le premier cas, il s'agit de production de cacaoyer hybride provenant de graines issues de la pollinisation des fleurs par autofécondation ou allogamie (Wood and Lass, 2001). Dans le deuxième cas, la technique de greffage (plus rarement de bouturage) peut être employée pour produire un clone, c'est-à-dire un cacaoyer ayant le même matériel génétique que la plante mère sur laquelle a été prélevé le greffon. Cette technique est utilisée soit en pépinière sur des jeunes plants de cacaoyers résultant de la germination de graines, soit sur des rejets de cacaoyers vieillissants nécessitant une réhabilitation.

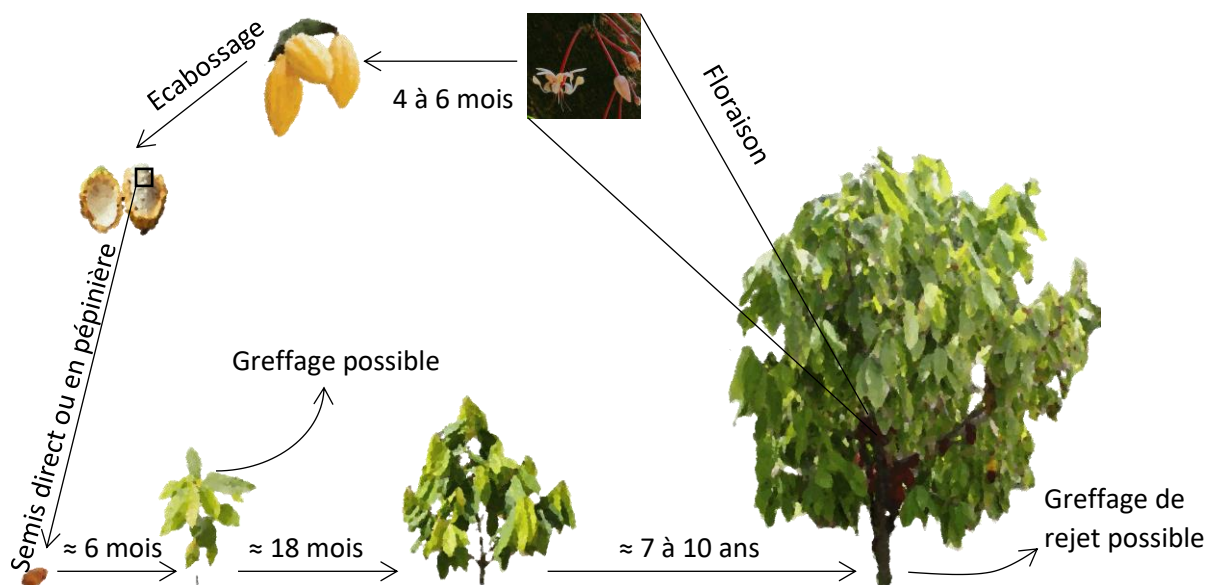


Figure 3. Les différentes phases du cycle de vie d'un cacaoyer.

A partir de 3 ans de développement, les premières cabosses apparaissent au niveau des coussinets floraux du tronc et des branches principales. Entre 7 et 10 ans, le cacaoyer est considéré comme mature, avec une productivité proche de son niveau maximal. La durée de production de certains cacaoyers peut parfois atteindre cent ans voire plus (Jagoret *et al.*, 2011). En fonction des zones géographiques et de leur climat, on observe un ou deux pics de production de cacao par an. Pour la culture du cacaoyer, la température optimale est comprise entre 20 et 30°C et la pluviométrie annuelle doit être préférablement supérieure à 1500 mm (Mossu, 1990). La floraison du cacaoyer dépend principalement de la quantité de précipitations. De toutes les fleurs produites par un cacaoyer, seulement 2% en moyenne forment des cabosses qui arrivent à maturité, à cause d'une faible fertilité ou d'un « wilt » physiologique élevé.

I.3.3. Les systèmes de culture du cacaoyer observés autour du globe et leurs performances agroéconomiques

La culture du cacaoyer à travers le globe revêt une diversité importante de modalités (Tableau 1) : il existe un large gradient de diversité et de densité de plantes associées, depuis des systèmes de culture monospécifiques (Malaisie, Brésil, Bolivie) jusqu'à des systèmes de culture plurispécifiques, aussi appelés systèmes agroforestiers (SAF) simples ou complexes (Amérique Centrale et Afrique centrale). Chez ces derniers, la densité des plantes associées dépasse parfois la densité en cacaoyers (Deheuvels *et al.*, 2012; Salazar-Díaz and Tixier, 2017a) et le nombre d'espèces différentes (richesse spécifique) par parcelle peut atteindre 22 (Abdulai *et al.*, 2018b).

On observe un certain compromis de densité entre les cacaoyers et les plantes associées : quand la densité des cacaoyers est élevée, celles des plantes associées est relativement faible et inversement (Tableau 1). Il existe par ailleurs une corrélation entre la densité en cacaoyers et en cultures associées avec le rendement observé pour chacun des deux groupes : plus la densité en cacaoyers est élevée, meilleur est leur rendement, ce qui est également le cas pour les cultures associées. On remarque aussi dans certaines études des liens entre le rendement et (i) la pluviométrie (Abdulai *et al.*, 2018b) et (ii) le mode de gestion du SAF, monoculture vs agroforesterie en agriculture conventionnelle ou biologique (Schneider *et al.*, 2017). L'étude d'Abdulai *et al.* (2018) ayant été conduite dans trois zones de production au Ghana suivant un gradient de pluviométrie, on peut voir que le rendement en cacao est corrélé positivement à la quantité de pluie. L'étude de Schneider *et al.* (2017), montre que le plein soleil conventionnel fournit les meilleurs niveaux de rendement en cacao, tandis que l'agroforesterie conventionnelle fournit un même niveau de rendement que les systèmes menés en agriculture bio (monoculture et agroforesterie confondus). Le mode de culture en agroforesterie en suivant les

contraintes du cahier des charges bio semble pertinent à condition que les cultures associées aient de bons niveaux de rendement, commercialisables ou intéressantes pour la consommation du ménage. Cependant, dans cette étude particulière, les arbres étaient encore trop immatures pour fournir des fruits, seules les musacées ont produit d'autres fruits que le cacao (Schneider *et al.*, 2017). Dans une certaine mesure, ces résultats sont concordants avec ceux présentés par Wood and Lass (2001), qui montrent que lorsqu'ils sont conduits sans intrants (ni fertilisants ni produits phytosanitaires), les SAF sont plus performants que le plein soleil.

Tableau 1. Densité et diversité des différentes cultures (cacaoyers et plantes associées) et les rendements correspondants dans les SAF cacao autour du globe

Mode de culture	Zone géographique	Particularité	Densité cacaoyers (.ha ⁻¹)	Densité cultures associées (.ha ⁻¹)	Diversité végétale (S)	Rendement cacao (+ chiffre d'affaire) (kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Rendement des cultures associées (+ chiffre d'affaire) (.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Publication
Système de culture monospécifique	Malaisie	-	1096 3333	0	1	1062 642	0	(Lockwood and Yin, 1996)
	Bolivie	Agriculture conventionnelle Agriculture biologique	625 625	0	1	680 333	0	(Schneider <i>et al.</i> , 2017)
	Brésil	-	2500 1250 625	0	1	1100 (frais) 800 (frais) 600 (frais)	0	(Dias <i>et al.</i> , 2000)
	Panama	Modélisation	1111	0	1	973	0	(Ramirez <i>et al.</i> , 2001)
SAF plurispécifique simple	Ghana	-	1074	67 <i>Gliricidia sepium</i> 150 <i>Cocos nucifera</i>	2 2	434 943	0 819 noix	(Osei-Bonsu <i>et al.</i> , 2002)
	Honduras	-	1100	± 114 <i>Cordia megalantha</i> ± 114 <i>Cedrela odorata</i>	2 2	493 (=513 US\$) 634 (=646 US\$)	4.5 m ³ (=1800US\$) 3.7 m ³ (=2306US\$)	(Dubon and Sanchez, 2007)
	Panama	Modélisation	278	833 <i>Musa paradisiaca</i> + 69 <i>Cordia megalantha</i>	3	400	1120 régimes + 6.8 m ³	(Ramirez <i>et al.</i> , 2001)
			556	556 <i>Musa paradisiaca</i> + 69 <i>Cordia megalantha</i>	3	801	770 régimes + 6.8 m ³	
			833	278 <i>Musa paradisiaca</i> + 69 <i>Cordia megalantha</i>	3	1200	400 régimes + 6.8 m ³	
	Honduras	-	1100	± 114 <i>Gliricidia sepium</i> + <i>Erythrina sp.</i> + <i>Inga sp.</i>	4	579 (=593 US\$)	0	(Dubon and Sanchez, 2007)
SAF plurispécifique complexe	Afrique de l'Ouest	-	600	106 arbres fruitiers	7	300 (=328 US\$)	(434 US\$)	(Gockowski <i>et al.</i> , 2004)
	Ghana	Pluviométrie : Faible (1200-1300 mm)	-	49	22	282 (62.5% CA)	(37.5% CA)	(Abdulai <i>et al.</i> , 2018a)

Suite Tableau 1. Densité et diversité des différentes cultures (cacaoyers et plantes associées) et les rendements correspondants dans les SAF cacao autour du globe

SAF plurispécifique complexe	Ghana	Pluviométrie : Moyenne (1300-1500 mm) Elevée (1700-1900 mm)	- -	23 34	11 16	712 (89% CA) 849 (89% CA)	(11% CA) (11% CA)	(Abdulai <i>et al.</i> , 2018a)
	Cameroun	Précédent savane	1174	34 <i>Musa sp.</i> + ?	8.1	717	-	(Nijmeijer <i>et al.</i> , 2019a)
		Précédent forêt	1198	98 <i>Musa sp.</i> + ?	10.6	702	-	(Jagoret <i>et al.</i> , 2017a)
		-	1516	190	9	737	-	(Jagoret <i>et al.</i> , 2017a)
		Agriculture conventionnelle	625	227 arbres + 625 <i>Musa sp.</i>	14	329	8957 kg régimes*	(Schneider <i>et al.</i> , 2017)
	Bolivie	Agriculture biologique	625	227 arbres + 625 <i>Musa sp.</i>	15	269	7115 kg régimes*	(Schneider <i>et al.</i> , 2017)
	Costa Rica	-	543	350	1.71 (Sh)	136	-	(Deheuvels <i>et al.</i> , 2012)
		-	417	619 <i>Musa sp.</i> + 115 arbres bois d'œuvre + 83 arbres fruitiers + 42 arbres bois de chauffe	6 à 17	191	7351 kg régimes + 26 m ³ bois œuvre + ? kg fruits + 5 m ³ bois chauffe	(Salazar-Díaz and Tixier, 2017a)
		-	592	171 <i>Musa sp.</i> + 11 <i>Citrus sp.</i> + 24 palmiers + 36 autres fruitiers + 67 arbres bois d'œuvre	-	146	427 kg bananes + 318 kg oranges + 377 kg noix palme + 403 autres fruits + 0.3 m ³	(Cerde <i>et al.</i> , 2014)
	Guatemala	-	605	7 <i>Musa sp.</i> + 17 <i>Citrus sp.</i> + 29 autres fruitiers + 14 arbres bois d'œuvre	-	296	13 kg bananes + 62 kg oranges + 571 autres fruits + 0.5 m ³	
	Nicaragua	-	654	159 <i>Musa sp.</i> + 6 <i>Citrus sp.</i> + 11 palmiers + 13 autres fruitiers + 44 arbres bois d'œuvre	-	494	2728 kg bananes + 138 kg oranges + 412 kg noix palme + 9265 autres fruits + 0.1 m ³	

*Arbres trop jeunes encore improductifs

I.3.4. La diversité des associations d'espèces comme potentiel agroécologique des SAF

La plurispécificité des systèmes agroforestiers en fait des systèmes complexes au sein desquels on peut observer une diversité des interactions entre espèces de différentes dimensions, et donc de différents encombrements horizontaux et verticaux de l'espace (Figure 4). Celles-ci peuvent porter sur l'accès aux ressources ou sur des effets allélopathiques par exemple, qui varient suivant la diversité des espèces, leur densité et leur répartition dans l'espace. Certaines associations d'espèces peuvent interagir de façon positive sur le développement de l'une des deux espèces ou bien même sur les deux espèces, via l'apparition de certains processus biologiques ou physiques favorables. Ce sont ces associations positives qu'il est pertinent de mettre en place dans les SAF, tandis que celles défavorables au développement de l'une ou des deux espèces sont plutôt à exclure.



Figure 4. Représentation schématique d'un SAF avec identification de trois strates et des cultures qui peuvent s'y développer.

Les traits biologiques et écologiques de chaque espèce peuvent influencer la fourniture de services écosystémiques des SAF (de Bello *et al.*, 2010; Damour *et al.*, 2015), et par conséquent peuvent impacter positivement ou négativement la croissance des plantes adjacentes. On parle alors respectivement d'effets de facilitation ou de compétition, qui sont schématiquement décrits dans la Figure 5. Cette diversité d'interactions entre les individus et les espèces renforce le caractère agroécologique de ces systèmes de culture. Par exemple, elles peuvent améliorer la fertilité des sols via le recyclage des éléments nutritifs comme l'ont montré (Nijmeijer *et al.*, 2019b) pour des savanes progressivement converties en SAF, ou bien réguler la présence et le développement de bioagresseurs tels que *Phytophthora palmivora* ou *Moniliophthora roreri* responsables respectivement de la pourriture brune et de la moniliose des cabosses suivant leur disposition spatiale (Gidoïn *et al.*, 2014a; Gidoïn *et al.*, 2014b).

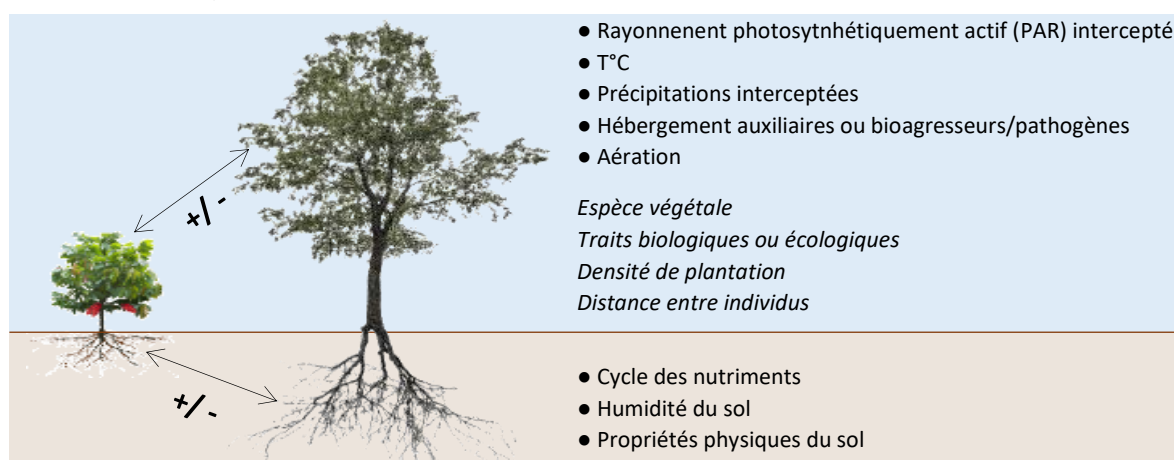


Figure 5. Représentation schématique des effets de facilitation ou de compétition suivant certains facteurs (en italique) entre les feuillages et les systèmes racinaires de deux espèces végétales différentes, ici le cacaoyer représentant la culture de rente principale et un arbre d'ombrage

I.4. LE CONTEXTE EN REPUBLIQUE DOMINICAINE

I.4.1. Evolution de la production nationale

D'après les statistiques du ministère de l'agriculture (SEA, 2016), la cacaoculture est pratiquée sur une surface agricole de 152 260 ha en République Dominicaine en 2015 (Figure 6), soit 6,25% de la SAU totale du pays. C'est la deuxième culture d'exportation après le tabac (FAOSTAT, 2018), à destination des Etats-Unis et de l'Europe principalement. La production de cacao dominicain ne cesse de croître sur les dernières années, et on observe par exemple une augmentation de 19% entre 2010 et 2015, de 58257 à 71905 tonnes de cacao marchand (SEA, 2016). D'après les statistiques du ministère de l'agriculture, le rendement moyen national serait passé de 360 kg.ha⁻¹ en 2003 à 480 kg.ha⁻¹ en 2015 (SEA, 2016). D'après Berlan and Bergès (2013) les rendements obtenus ne représentent que la moitié du rendement potentiel. Au classement mondial, la République Dominicaine est le 9^{ème} pays producteur de cacao (ICCO, 2016), mais il se situe en 1^{ère} position pour le cacao certifié biologique (Communication personnelle Comision Nacional del cacao, 2019). Pas moins de 48% de la production nationale provient de 84 500 ha de SAF certifiés en agriculture biologique en 2017 (communication personnelle de la Comision Nacional de cacao, 2019), alors que la production de cacao bio ne représentait que 25% en 2010 (Berlan and Bergès, 2013c).

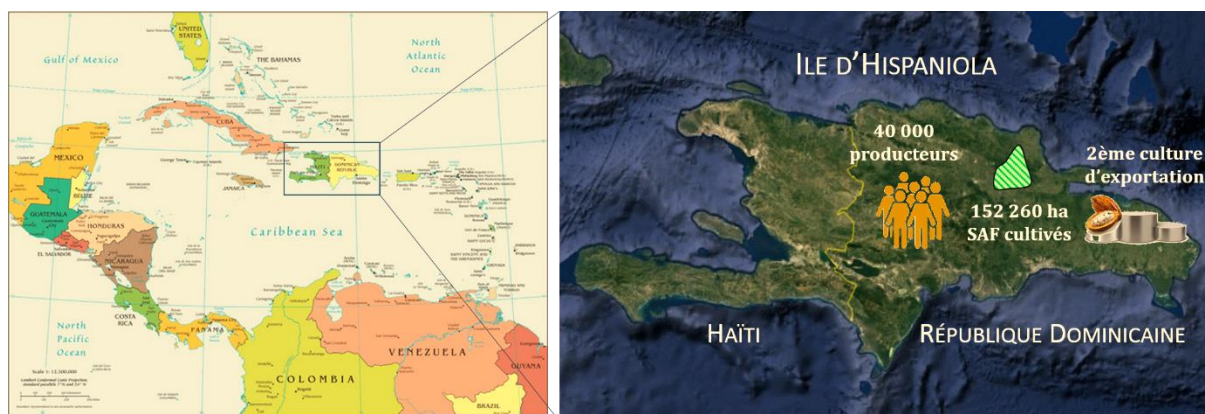


Figure 6. Situation géographique de la République Dominicaine dans les Caraïbes (à gauche) et schématisation des principales données sur la culture du cacao du pays (à droite).

I.4.2. La cacaoculture dominicaine : des systèmes agroforestiers

Il existe relativement peu d'études de caractérisation du secteur productif en République Dominicaine (Batista, 2009b; Deheuvels, 2015; Mattalia, 2016). La production de cacao est le fait d'environ 40 000 producteurs et leurs familles (Berlan & Bergès, 2013), dont les revenus dépendent majoritairement de cette culture, avec pour plus de 64% d'entre eux des surfaces cultivées en cacao inférieures à 5 ha (Batista, 2009). D'après Mattalia (2016), 8% des producteurs disent dépendre exclusivement de la vente du cacao, et 86% déclarent qu'il s'agit de leur première source de revenu. Les cacaoyers sont cultivés dans des systèmes agroforestiers (SAF) très diversifiés où ont été recensées entre 44 et 75 espèces différentes (Figure 7), dont les produits ne sont que peu ou pas valorisés commercialement mais très utilisés dans l'alimentation des ménages (Deheuvels 2015 ; Mattalia 2016). La République Dominicaine, de par sa situation insulaire a été préservée de maladies dévastatrices telles que la moniliose (*Moniliophthora roreri*) et le balai de sorcière (*Moniliophthora perniciosa*) qui occasionnent des pertes de rendement considérables, jusqu'à 90% sur le continent sud-américain. Seule la pourriture brune des cabosses (*Phytophthora palmivora*), ainsi que des nuisibles tels que les rats et les pics-verts, occasionneraient des pertes de rendement, jusqu'à 25% (Batista, 2009).

La gestion technique des SAF est relativement homogène parmi les producteurs à travers le pays. A chaque passage pour récolter les cabosses, les cacaoyers sont égourmandés, c'est-à-dire que les rejets présents habituellement à la base du tronc sont coupés. La taille intervient après le pic de récolte principal, observé de mars à juin, si le statut physiologique le permet, c'est-à-dire à condition que le cacaoyer n'ait pas émis de nouvelles branches. Cette taille, dite de maintien, permet de conserver la forme globale « en coupe » et d'éviter les croisements de branches entre cacaoyers. Elle est effectuée sur des branches atteignables à hauteur d'homme. Les cacaoyers ne sont donc généralement pas élagués sur la partie haute de leur frondaison. Pour les plantes associées, aucune pratique particulière n'est effectuée : elles se développent sans aucune intervention du producteur.

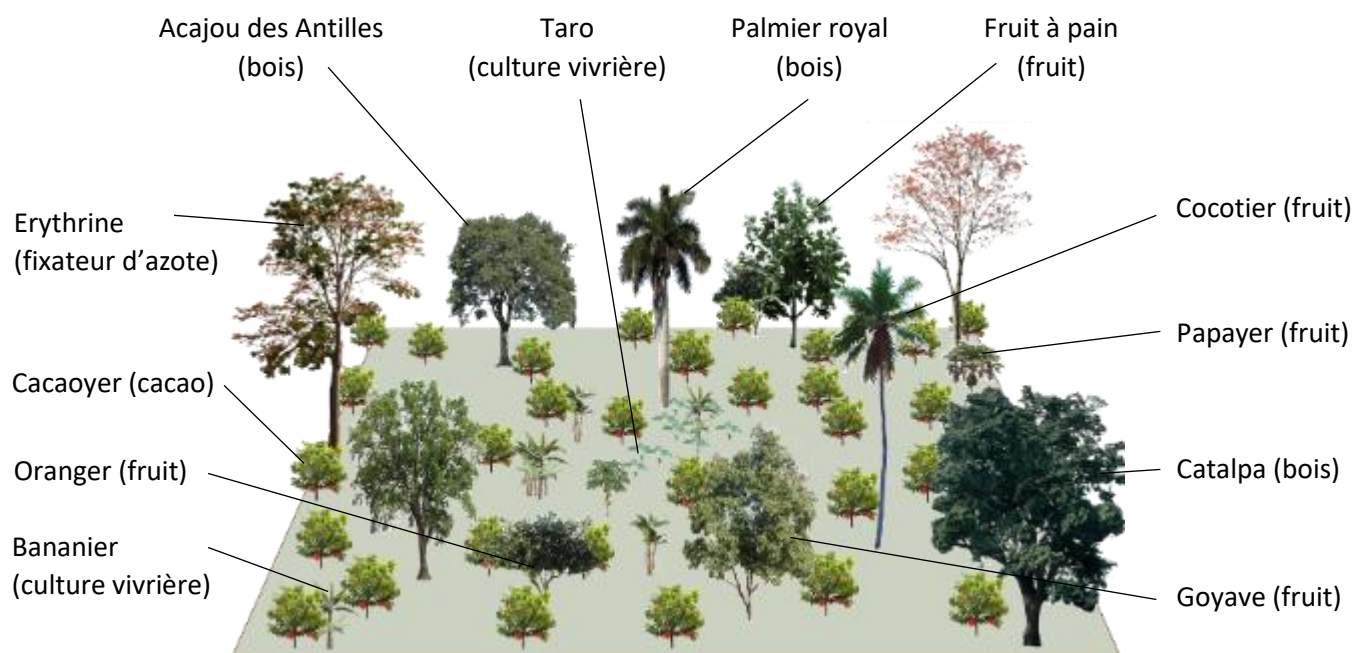


Figure 7. Représentation schématique d'un SAF à base de cacaoyers dominicain vu en profondeur avec certaines cultures associées à partir des données de Batista (2009), Deheuvels (2015) et Mattalia (2016).

I.4.3. La situation socioéconomique des producteurs et de leur famille

D'après Berlan and Bergès (2013), le chiffre d'affaire moyen provenant de la vente du cacao était de 730US\$.ha⁻¹ en 2008 (Berlan and Bergès, 2013) et de 1135 US\$.ha⁻¹ en 2016 (SEA, 2017). L'augmentation est assez surprenante certes, mais il est important de prendre en compte le taux d'inflation à la consommation qui, entre les années 2008 et 2015, était en moyenne de 4,9% par an (Worldbank, 2017). D'après Berlan and Bergès (2013), en faisant l'hypothèse qu'ils n'aient pas d'autres sources de revenu, les producteurs aux rendements en cacao moyens ou faibles et possédant de petites surfaces cultivées en cacao (<4 ha) sont en-dessous du seuil de pauvreté.

Par ailleurs, la production de cacao dominicain est le fait de producteurs vieillissants qui ont en moyenne 60 ans (Deheuvels 2015). Aujourd'hui la cacaoculture n'attire plus les jeunes : dans la principale région productrice du pays, seulement 60% des producteurs affirment que la reprise de l'exploitation est assurée (Mattalia 2016). A cause de rendements généralement bas et de prix d'achat très volatils, le secteur de la production de cacao pourrait s'effacer progressivement en République Dominicaine (Berlan and Bergès, 2013).

I.5. PROBLEMATIQUE, QUESTIONS DE RECHERCHE ET HYPOTHESES

L'enjeu principal du secteur cacao dominicain est de rendre économiquement attractive la culture du cacaoyer pour la nouvelle génération, soit par l'augmentation des rendements de cacao, soit par une augmentation de la production et une meilleure valorisation des autres produits provenant des systèmes agroforestiers.

Hypothèse 1 : Au travers de la densité et la diversité des cultures associées, la structure des SAF impacte les performances économiques. Certaines structures devraient permettre aux agriculteurs et leur famille de vivre décemment de la culture des cacaoyers et des cultures associées (Figure 8).

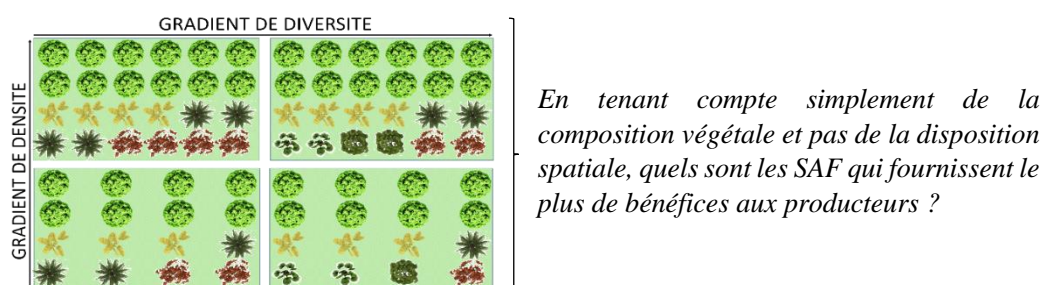


Figure 8. Schématisation de la question de recherche liée à l'hypothèse 1. Chaque rectangle représente une même unité de surface, chaque symbole représente une culture associée : le cacaoyer est représenté par un cercle vert, les autres cultures représentées sont les bananiers, les palmiers, les fixateurs d'azote, les cultures vivrières et les arbres à bois.

Hypothèse 2 : La mise au point d'une méthode de conception participative et son application concrète avec différents acteurs locaux faciliterait l'émergence d'innovations techniques utiles pour améliorer la productivité des SAF (Figure 9).

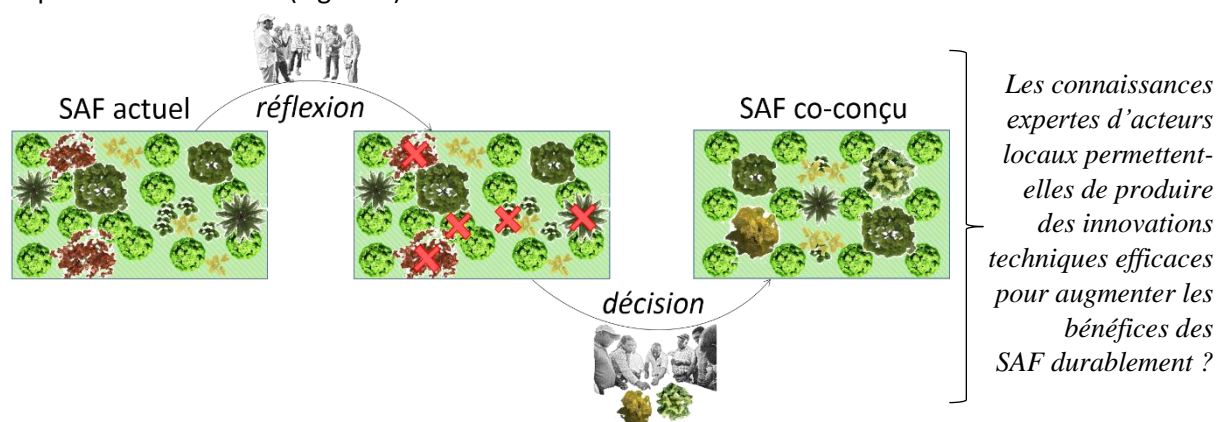


Figure 9. Schématisation de la question de recherche liée à l'hypothèse 2.

Hypothèse 3 : Une compréhension plus fine des déterminants de la productivité de chaque plante du SAF, par rapport à ses propres traits ainsi que ceux des plantes voisines, aiderait au processus de conception de SAF innovants et performants (Figure 10).



Figure 10. Schématisation de la question de recherche liée à l'hypothèse 3.

I.6. MATERIELS ET METHODES

I.6.1. Le contexte de réalisation de la thèse

La thèse a été menée dans le cadre du projet Cacao Forest, qui réunit des partenaires très divers : des industriels du chocolat (Valrhona, Bjorg Bonnetterre et Citoyens, Weiss, Révillon), des artisans chocolatiers (Relais Desserts), une ONG (Earthworm) et des scientifiques (CIRAD et ISARA). Le pays dans lequel a démarré le projet est la République Dominicaine où les industriels se fournissent en cacao, et où des études ont été conduites par le CIRAD en 2015 et TFT (ancien nom de l'ONG Earthworm) en 2016 pour avoir une vue d'ensemble du secteur de production de cacao, de la caractérisation des SAF aux dynamiques rurales. A travers une alliance entre partenaires locaux (sociétés d'exportation de cacao, coopératives et associations de producteurs dominicaines) et internationaux (cités ci-dessus), l'ambition du projet Cacao Forest est de générer des innovations techniques pour une cacaoculture durable, des points de vue économique, social et environnemental, en République Dominicaine (pour plus d'informations, cf. le site <http://www.cacaoforest.org/>).

I.6.2. Choix des zones d'étude

Les zones d'étude de terrain ont été choisies suivant les zones d'approvisionnement en cacao des industriels chocolatiers finançant le projet Cacao Forest. Celles-ci se situent dans les provinces d'El Seibo, de Duarte et de San Cristobal (Figure 11) qui comptabilisent chacune respectivement 8,3%, 36,5% et 1,7% des surfaces de SAF à base de cacaoyers à l'échelle nationale (Deheuvels, 2015). Dans les zones d'El Seibo et de Duarte, les partenaires locaux sont la coopérative CONACADO et la société d'exportation Rizek. Dans la province de San Cristobal, le partenaire local est FUNDOPO, une association de producteurs de cacao.

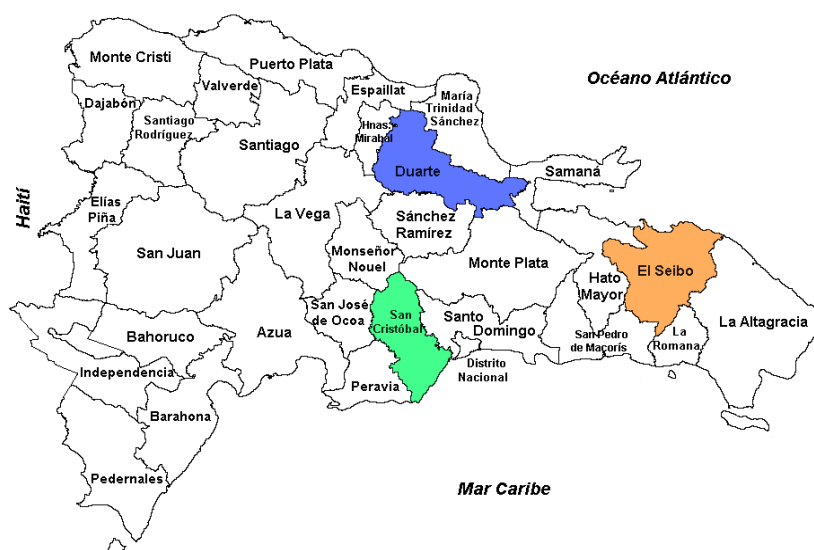


Figure 11. Carte de la République Dominicaine et localisation des trois provinces d'étude : El Seibo, Duarte et San Cristobal.

I.6.3. Diagnostic agronomique partiel pour caractériser les performances agroéconomiques des SAF dominicains et leurs déterminants

Un diagnostic agronomique régional repose sur l'analyse des pratiques agricoles et du milieu, généralement sur des réseaux de parcelles agricoles, pour comprendre le raisonnement des agriculteurs et les déterminants des performances agronomiques (Doré et al, 1997 ; Doré et al, 2008). Dans notre cas, le diagnostic a porté sur les SAF à base de cacaoyers des trois provinces étudiées, et plus précisément sur leur structure et leur productivité (agronomique et économique), sans rentrer précisément dans les détails de l'itinéraire technique, c'est-à-dire des pratiques de gestion des SAF (taille, fertilisation, application de produits phytosanitaires). Deux approches différentes ont été mises en œuvre au cours de la thèse pour produire deux diagnostics agronomiques partiels, l'une appelée « approche mixte » combinant des données mesurées dans les SAF et des données d'enquêtes auprès des agriculteurs, l'autre appelée « approche *in situ* » fondée uniquement sur des données de terrain mesurées. Les variables et les termes utilisés ainsi que leurs abréviations sont résumés dans le Tableau 2 et dans la Figure 12.

I.6.3.a. Approche mixte

Le diagnostic agronomique par l'approche mixte, utilisée dans le Chapitre II, a été conduit en deux étapes au cours desquelles différentes données (Tableau 2) ont été recueillies :

- (i) les données mesurées en parcelles portant sur la structure des SAF avec le recensement des espèces cultivées et de leurs densités de plantation, et de la hauteur et de la surface terrière (via la mesure de la circonférence du tronc) de chaque plante ligneuse,
- (ii) les données déclaratives au travers d'un entretien avec le producteur portant sur les quantités récoltées pour chaque espèce cultivée recensée dans son SAF, en faisant la distinction entre les quantités vendues et autoconsommées, ainsi que sur les prix de vente de ces produits. D'autres données portant sur l'âge et le mode de production des cacaoyers, la surface totale du ou des SAF de l'exploitation, sur de potentielles autres activités agricoles ou non-agricoles, et sur la composition du ménage (notamment le nombre de personnes à charge) ont été obtenues aux cours de ces interviews.

I.6.3.b. Approche *in situ*

L'approche *in situ*, utilisée dans le Chapitre IV, nécessite les mêmes mesures que celles effectuées en parcelles pour l'approche mixte. Cependant, à la différence de la première approche, les données de rendements, de quantités de produits vendus, consommés et perdus ont elles aussi été mesurées pour chaque individu (plante cultivée). L'âge de chaque individu a été donné par le producteur. L'autre particularité de cette approche *in situ* est qu'elle a requis une cartographie des parcelles étudiées permettant ainsi de calculer les distances entre individus. Ces distances ont été utilisées pour étudier l'incidence des espèces cultivées voisines, soit à une distance inférieure à 5 m, sur la productivité de chaque individu.

I.6.3.c. Les variables clés du diagnostic agronomique partiel

Tableau 2. Principales variables des diagnostics agronomiques conduits dans la thèse et leurs unités. La dernière colonne du Tableau précise l'approche pour laquelle la variable a été utilisée et de quelle manière elle a été recueillie, M pour « mesurée », I pour via une « interview ».

Catégorie	Variable	Unité	Utilisée pour l'approche
Agronomie et Structure du SAF	Richesse spécifique	Nombre d'espèces cultivées recensées par 1000m ²	Mixte et <i>in situ</i> (M)
	Densité de plantation	individus.ha ⁻¹	Mixte et <i>in situ</i> (M)
	Hauteur de l'individu	m	Mixte et <i>in situ</i> (M)
	Surface terrière de l'individu	m ²	Mixte et <i>in situ</i> (M)
	Distance entre individus i et j	m	<i>In situ</i> (M)
	Surface de SAF	m ²	Mixte (I)
	Age de l'individu	années	Mixte et <i>in situ</i> (I)
	Mode de production des plants*	%	Mixte (I)
	Rendement	kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹ unité.ha ⁻¹ .an ⁻¹ planches.ha ⁻¹ .an ⁻¹	Mixte (I) et <i>in situ</i> (M)
Economie	Chiffre d'affaire de la vente et/ou valeur économique de l'autoconsommation	US.ha ⁻¹ .an ⁻¹	Mixte (I)
		US\$.ha ⁻¹ .an ⁻¹	<i>in situ</i> (M)
		US\$.individu ⁻¹ .an ⁻¹	

*soit produit par le producteur lui-même, soit acheté à une pépinière extérieure

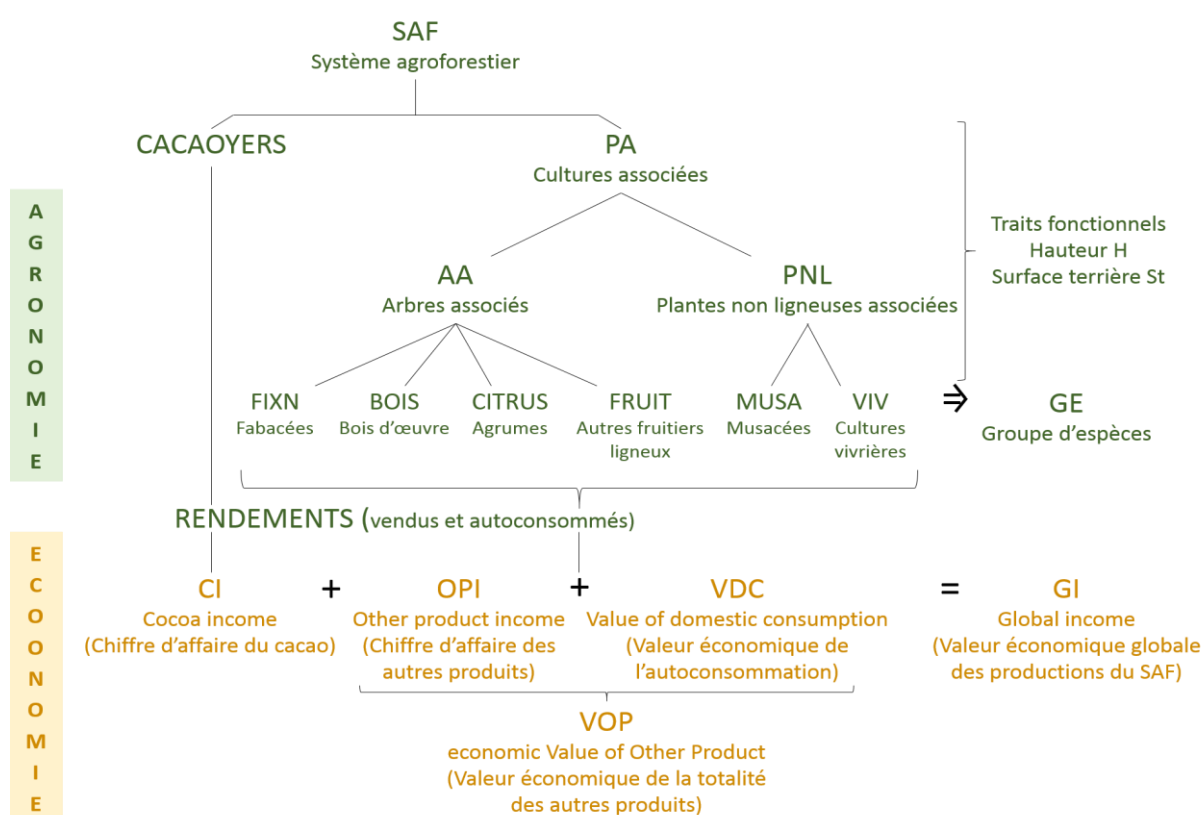


Figure 12. Synthèse schématique des différentes composantes des SAF qui sont étudiées dans la thèse, dans les deux disciplines de l'agronomie (en vert) et de l'économie (en orange).

I.6.4. La démarche de co-conception

Le but de la démarche de co-conception était de construire collectivement des prototypes de SAF permettant de répondre aux objectifs fixés après la réalisation du premier diagnostic agronomique (Rapidel *et al.*, 2009; Le Bellec *et al.*, 2011; Dogliotti *et al.*, 2014; Husson *et al.*, 2015). En associant des connaissances et savoir-faire provenant des communautés agricole, scientifique et technique, des prototypes innovants et performants devaient voir le jour, avec une meilleure probabilité d'adoption par les producteurs (Faure *et al.*, 2010 ; Voinov & Bousquet 2010). Des producteurs aux SAF dont les structures sont contrastées ont été invités à prendre part à ces ateliers de conception afin d'enrichir les points de vue et les discussions. Lorsque cela a été possible, ils ont été sélectionnés dans la typologie des SAF, constituée lors de la première phase de recherche à partir du diagnostic agronomique mixte (Notaro *et al.*, 2019). Une conception « pas à pas » de prototypes de SAFc (le cacaoyer étant une culture pérenne) était exclue dans notre cas car incompatible avec la durée de la thèse. Le plus pertinent au vu de ce contexte (problématique et logistique), était une conception « de novo » basée sur le prototypage en atelier de conception participative (Vall *et al.*, 2016) avec simulation des trajectoires économiques des prototypes co-conçus à moyen et à long terme (Deheuvels, 2013).

I.6.5. Dispositif de recherche général

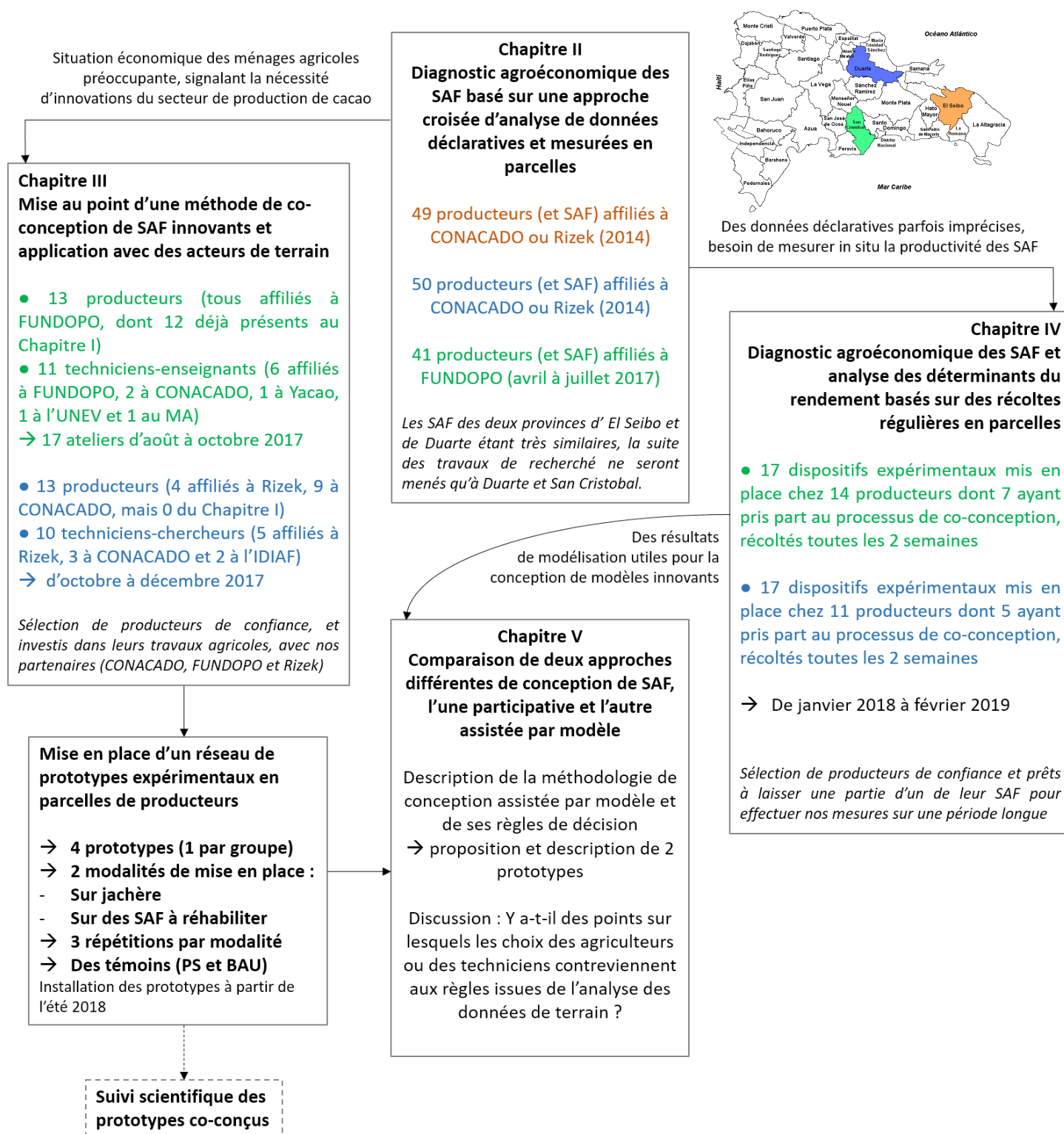


Figure 13. Schéma récapitulatif des chapitres de la thèse, précisant la localisation, l'échantillonnage, et les liaisons entre ces chapitres. Le code couleur indique la province correspondante : en orange la province d'El Seibo, en bleu la province de Duarte et en vert la province de San Cristobal. La carte de la République Dominicaine dans le coin droit supérieur permet de les localiser. La mise en place du réseau de prototypes expérimentaux permettra d'évaluer les prototypes co-conçus, mais c'est un aspect de développement du projet « Cacao Forest » qui ne sera pas traité dans cette thèse.

CHAPITRE II. PLANT DIVERSITY AND DENSITY IN COCOA-BASED AGROFORESTRY SYSTEMS: HOW FARMERS' INCOME IS AFFECTED IN THE DOMINICAN REPUBLIC

II.1. INTRODUCTION

Most cocoa around the world is cultivated under the shade of associated plants (Schroth and do Socorro Souza da Mota, 2014), in a wide range of more or less shaded cropping systems (Rice and Greenberg, 2000) called agroforestry systems (AFS). The structure of cocoa-based AFS follows a double gradient based on (i) plant density and (ii) plant species richness, ranging from a single species associated with the cocoa trees (Osei-Bonsu *et al.*, 2002; Dubon and Sanchez, 2007; Somarriba and Beer, 2010) to a very large number of plant species (Deheuvels, 2011; Deheuvels *et al.*, 2012; Cerda *et al.*, 2014; Abdulai *et al.*, 2018a; Suarez Salazar *et al.*, 2018b), woody or not, occupying different strata. As a result, cocoa-based AFS can provide a wide range of products in terms of quality and quantity. These products are sold, self-consumed and some are even not harvested, and their value is added to that of cocoa, the main cash crop. Furthermore, the positive environmental impacts of cocoa-based AFS are widely recognized unlike those of monospecific systems (Vaast and Somarriba, 2014). AFS provide more ecosystem services than full sun monocrops (De Beenhouwer *et al.*, 2013; Mortimer *et al.*, 2017a).

The economic advantages of AFS over monocrop systems is less clear. Cocoa yields from AFS range from 106 kg.ha⁻¹.yr⁻¹ in complex AFS based on average densities of 543 cocoa trees and 350 associated plants per hectare (Deheuvels *et al.*, 2012), to 2,000 kg.ha⁻¹.yr⁻¹ in full sun monocropping systems based on 1,111 cocoa trees per hectare (Wood and Lass, 2001). The trade-off between cocoa yield and the associated plant density (Rapidel *et al.*, 2015) can be balanced by the productivity of the associated crops (Cerda *et al.*, 2013), which can often be sold or self-consumed by farmers and their families (Salazar-Díaz and Tixier, 2017b), thereby improving the livelihood of agricultural households, especially when cocoa prices are low (Clough *et al.*, 2009). In Central America, Cerda *et al.* (2014) showed that AFS based on 600 cocoa trees.ha⁻¹ and 287 associated plants.ha⁻¹, allowed a US\$586.ha⁻¹.yr⁻¹ total sales, 75% of which came from cocoa. The opportunity cost generated by the self-consumption of products harvested from these cocoa-based AFS was US\$827.ha⁻¹.yr⁻¹, highlighting the interest of cocoa-based AFS for food security (Cerda *et al.*, 2014).

Simple AFS combining cocoa with timber trees also has long-term economic advantages. Distributed over 12 years, cocoa production was shown to generate an income ranging from US\$590 to US\$650.ha⁻¹.yr⁻¹, while the associated timber trees generated incomes of US\$1,800 and US\$2,300.ha⁻¹.yr⁻¹ respectively (Dubon and Sanchez, 2007). Simple AFS in which cocoa trees are only intercropped with coconut (*Cocos nucifera*) or banana (*Musaceae*), can be very profitable thanks to (i) higher yields of cocoa and associated fruits and (ii) easier management linked with reduced diversity and simplified plantation design (Osei-Bonsu *et al.*, 2002; van Asten *et al.*, 2011). In Costa Rica, Salazar-Díaz and Tixier (2017b) showed that the productivity of cocoa and banana crops in the lower stratum decreased with an increase in the density and diversity of associated timber and fruit trees, because of competition for light. These authors also showed that the overall productivity of cocoa-based AFS with associated timber and fruit trees is statistically higher than the cocoa-banana association. They showed that the associated fruit and timber trees can more than compensate for reduced banana and cocoa yields. Finally, in Bolivia, when considering all the products harvested from the same plot, cocoa-based AFS are 161% more productive than cocoa monocrops (Schneider *et al.*, 2016). Labor efficiency was estimated to be twice as high in cocoa-based AFS than in cocoa monocrops (Armengot *et al.*,

2016). Other authors have shown that labor efficiency decreases with an increase in inputs as higher yields do not compensate for higher inputs (Jezeer *et al.*, 2018).

The agronomic and economic performances of cocoa-based AFS are therefore influenced by the technical choices made by the farmers and by the structure of the plant community they cultivate. We hypothesized that there is an optimal density and diversity of cocoa trees and associated plant species that enables optimal overall productivity and income from cocoa-based AFS. We tested this hypothesis in the Dominican Republic where all cocoa is produced exclusively under AFS (Batista, 2009a) on 152,260 ha by about 40,000 farmers and their families (Berlan and Bergés, 2013a). Most cocoa farmers are smallholders, and do not have the financial resources or technical skills to intensify their practices, which makes them vulnerable (Berlan and Bergés, 2013a). We characterized 140 cocoa-based AFS fields located in three main cocoa production areas of the Dominican Republic, in order to (i) build a structure-based typology of the Dominican cocoa-based AFS, and (ii) study the relationship between the structure and diversity, and the economic performance at field scale of the Dominican cocoa-based AFS types.

II.2. MATERIAL AND METHODS

II.2.1. Study sites

The study was conducted in the Dominican Republic provinces of Duarte (19°21' N; 70°03' W), El Seibo (18°77' N; 69°10' W) and San Cristobal (18°42' N; 70°10' W) (Figure 14). These three main cocoa production areas account for 42% of the Dominican territory cultivated under cocoa-based AFS and for more than 70% of national cocoa production (Deheuvels, 2015).



Figure 14. Location of the 140 cocoa-based AFS sampled in 3 main cocoa production areas: Duarte (red dots), El Seibo (purple dots) and San Cristobal (yellow dots).

Temperatures are similar in the three provinces, ranging from 19 °C minimum to 32 °C maximum averages (Figure 15). Precipitation is also similar in the provinces, ranging from 1,600 to 1,800 mm per year.

The average soil conditions in the different production areas are favorable for cocoa production: 3.2% organic matter, pH 6.9, 0.3 meq K/100mL of soil, 18 ppm Ca, 4.3 ppm Mg, 10 ppm P, 8 ppm Zn and 2 ppm S (Dominguez, 1983).

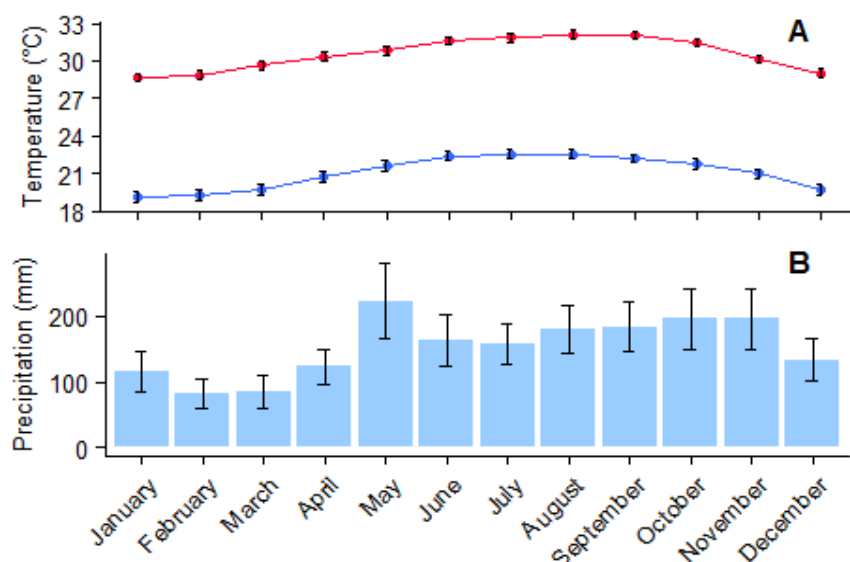


Figure 15. Meteorological data. A) average minimum temperatures (blue line) and maximum (red line) and B) average precipitation in the three study areas for the period 1981 to 2010 (source: ONAMET (2017))

II.2.2. Selection of farmers and cocoa-based AFS fields

The cocoa farmers surveyed were selected from membership lists provided by local farmer associations, cooperatives and cocoa-export companies in San Cristobal, Duarte and El Seibo provinces. The aim of selection was to obtain a regular and random sampling at the scale of each supply area. A total of 140 farmers were selected: 50 in Duarte province, 49 in El Seibo province and 41 in San Cristobal province. Average altitudes of the 140 cocoa-based AFS plots ranged between 154 m and 214 m above sea level.

An interview was conducted with each farmer to gather information on one specific cocoa-based AFS field per farmer. The cocoa-based AFS field was selected by the farmer from among all the cocoa-based AFS fields he/she owned, usually the one located closest to the homestead. However, about 44% of the selected farmers only had one cocoa-based AFS on their farm. The information collected (Table 3) included (i) age, productivity and mode of selection of the cocoa trees, as well as average farm gate cocoa price, and (ii) associated products and their related yields, uses (sold or self-consumption) and average farm gate prices for the year 2016. We then compared the average prices provided by farmers with the data on the Dominican Ministry of Agriculture website (Ministerio de Agricultura, 2017) and found no obvious differences. The mode of cocoa tree selection refers either to on-farm selection using cocoa beans resulting from free pollination of highly productive cocoa trees selected by the farmers, or to external selection made in a commercial nursery that produce improved varieties. The total area of the cocoa field was measured with a GPS and each plot was geo-located at the center of the cocoa field to minimize border effects.

A 1,000 m² sample plot (20 m x 50 m) was delimited in each cocoa-based AFS field, following Deheuvels *et al.* (2012). On each 1,000 m² plot, we inventoried and measured (i) the number, total height and diameter at 30 cm above ground level (DBH₃₀) of all cocoa trees, and (ii) the number of associated species, we only measured the total height of ligneous plants (leguminous, timber and fruit trees) (Table 3).

Table 3. Variables collected in interviews (I) led with 140 cocoa farmers or measured (M) on 1,000m² plots of 140 cocoa-based AFS fields.

Category	Collection method	Variable	Short name	Unit
Plant Structure variables	M	Richness of associated plants	S	species.1,000m ⁻²
	M	Density of <i>Musaceae</i>	musaD	plants.ha ⁻¹
	M	Density of fruit trees	fruitD	trees.ha ⁻¹
	M	Density of timber trees	timberD	trees.ha ⁻¹
	M	Density of N-fixing trees	fixND	trees.ha ⁻¹
	M	Height of the associated plants	treeH	meters
	M	Density of the cocoa trees	cocoaD	cocoa trees.ha ⁻¹
	M	Height of the cocoa trees	cocoaH	meters
	I	Proportion of cocoa trees selected on farm	propCselect	%
	M	Basal area of the cocoa trees	cocoaSt	m ²
	I	Age of the cocoa trees	ageC	years
	I	Total area of the cocoa-based AFS field	A	hectares
Yield variables	I	Cocoa yield	yC	kg.ha ⁻¹ .yr ⁻¹
	I	Yield of sold products other than cocoa	yOPS	unit.kg ⁻¹ .ha ⁻¹ .yr ⁻¹
	I	Yield of self-consumed other products	yOPC	unit.kg ⁻¹ .ha ⁻¹ .yr ⁻¹
	I	Sold products other than cocoa	NbPS	number of products
	I	Self-consumed products	NbPC	number of products
Economic variables	I	Selling price of cocoa	pC	US\$.kg ⁻¹
	I	Selling price of other sold products	pOP	US\$.kg ⁻¹

II.2.3. The typology of cocoa-based AFS based on their structure

A descriptive principal component analysis (PCA) was performed to identify correlations among the first nine variables of cultivated plant structure listed in Table 3): (i) the proportion of cocoa trees selected on-farm, (ii) the average height of the cocoa trees, (iii) the average height of the associated trees, (iv) the density of the cocoa trees, (v to viii) the density of each type of associated plants (fruit trees, timber trees, *Musaceae* and N-fixing trees), and (ix) the specific richness of the associated plants. These nine variables were then subjected to hierarchical cluster analysis (HCA) to build a typology of Dominican AFS. We did not include the three remaining structural variables (average age and basal area of cocoa trees and total surface area of the AFS field area) as it drastically reduced the inertia of the scatterplot, but the three variables were subsequently used as input data for the analysis of the typology groups.

II.2.4. Assessment of economic performance

The following economic indicators, expressed in US\$.ha⁻¹.yr⁻¹, were used to compare economic performances among types:

- the annual income per hectare from cocoa: $CI = yC * pC$,
- the annual income per hectare from other products: $OPI = \sum_{i=1}^{NbPS} yOPS_i * pOP_i$,
- the value of domestic consumption: $VDC = \sum_{i=1}^{NbPC} yOPC_i * pOP_i$,
- the global income generated by the cocoa-based AFS (sum of sales of cocoa and other products, as well as the value of domestic consumption): $GI = CI + OPI + VDC$,

where yC , pC , $yOPS$, pOP , $yOPC$ are described in **Table 3**. Other products included fruits, berries, bunches, grains but not timber because in 2016, none of the 140 producers had marketed timber.

II.2.5. Statistical analyses

Graphics were produced and statistical analyses were performed with R software, version 3.5.1 (R Core R Core Team, 2018). PCA and HCA analyses were carried out with the FactoMineR package (Husson *et al.*, 2010) and ade4 (Dray and Dufour, 2007), respectively. Our 140 cocoa-based AFS were grouped according to their degree of dissimilarity under the HCA algorithm, using Euclidean distances. The clusters identified by HCA were tested, for each variable (structural or economic), by permutation Student's t-test using the RVAideMemoire package (Hervé, 2016).

II.3. RESULTS

II.3.1. Typology of cocoa-based AFS based on their structure

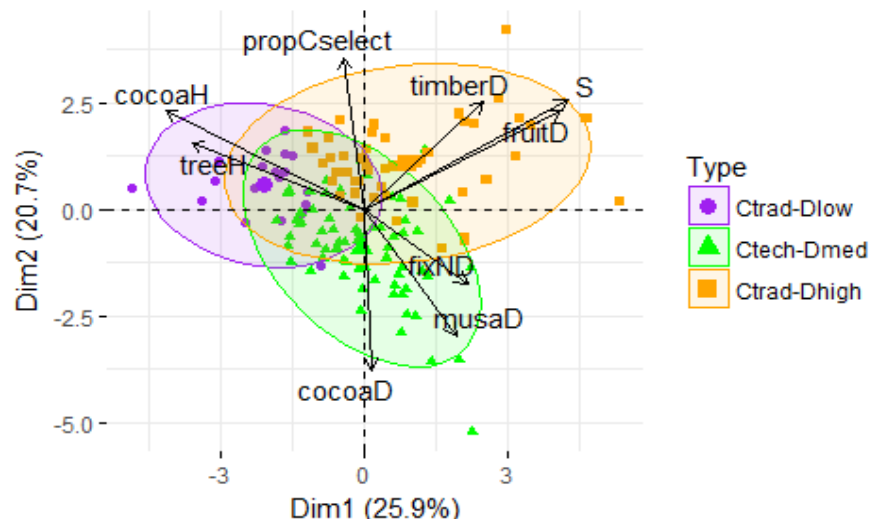


Figure 16. Principal component analysis of nine variables characterizing the structure of a sample of 140 cocoa-based AFS. Only the first two axes (46.6% of the total variability) are represented here.

The PCA revealed: (i) a positive correlation between the height of the associated trees (treesH) and the height of the cocoa trees (cocoaH), (ii) a positive correlation between the richness of associated plants (S) and the density of the fruit trees (fruitD) and timber trees (timberD), (iii) a negative correlation between tree height (cocoa trees and other ligneous species) and associated plant richness (S), and also with fruit tree density (fruitD), (iv) a negative correlation between cocoa tree density (cocoaD) and the proportion of cocoa trees selected on-farm (propCselect) (Figure 16). As shown in Figure 16, the HCA identified three distinct types of cocoa-based AFS:

1. type Ctrad-Dlow, the barycenter is correlated with the height of associated trees and cocoa trees;
2. type Ctech-Dmed is rather centered on the PCA graph, slightly correlated with cocoa tree density;
3. type Ctrad-Dhigh is correlated with the specific richness of plants associated with cocoa trees, as well as with the density of associated fruit trees and timber trees.

Table 4 lists the statistical contributions of the nine structural variables to distinguishing the three types of cocoa-based AFS.

Table 4. Comparison of three cocoa-based AFS based on the average values of nine AFS structural variables and performed with permutation Student's *t* tests. Significant differences (*p*-value<0.05) are indicated by different letters (a, b, c).

Variable	Unit	Ctrad-Dlow (N=20)		Ctech-Dmed (N=71)		Ctrad-Dhigh (N=49)	
		Mean +/- SD		Mean +/- SD		Mean +/- SD	
S	species.1000m ⁻²	3.0 ± 0.9	c	4.6 ± 1.4	b	7.5 ± 2.2	a
musaD	trees.ha ⁻¹	65.0 ± 40.0	a	98.0 ± 67.0	a	89.0 ± 60.0	a
fruitD	trees.ha ⁻¹	14.0 ± 14.0	c	51.0 ± 31.0	b	146.0 ± 88.0	a
timberD	trees.ha ⁻¹	5.0 ± 6.0	b	7.0 ± 8.0	b	25.0 ± 26.0	a
fixND	trees.ha ⁻¹	16.0 ± 10.0	a	26.0 ± 28.0	a	21.0 ± 19.0	a
treeH	meters	18.0 ± 6.7	a	8.3 ± 2.8	b	9.2 ± 2.9	b
cocoaD	trees.ha ⁻¹	732.0 ± 120.0	b	880.0 ± 181.0	a	658.0 ± 147.0	b
cocoaH	meters	5.7 ± 0.7	a	4.2 ± 0.7	b	4.3 ± 0.6	b
propCselect	%	61.0 ± 33.0	a	12.0 ± 16.0	b	59.0 ± 30.0	a

Only *Musaceae* and N-fixing tree densities did not differ statistically among types (**Table 4**). The other seven variables differed significantly among the three types (Figure 17). Species richness differed significantly between the three types, ranging from 3.0 for the Ctrad-Dlow type to 7.5 for the Ctrad-Dhigh type. The densities of fruit and timber trees differed among the three types and increased from the Ctrad-Dlow type to the Ctrad-Dhigh type. By summing the densities of the plants associated with the cocoa trees (musaD + fruitD + timberD + fixND), we obtained significantly different average densities between types, the lowest being for the Ctrad-Dlow type and the highest for Ctrad-Dhigh type. The Ctech-Dmed type exhibited intermediate species diversity and species density associated with the cocoa trees (Table 4). This type also had a higher cocoa tree density than the other two types and the overwhelming majority of the cocoa trees (88% vs. 39% and 41% for Ctrad-Dlow and Ctrad-Dhigh, respectively) came from a commercial nursery. Finally, both cocoa trees and associated trees were taller in the Ctrad-Dlow type than in the other two types.

Musaceae was the crop most densely associated with cocoa trees, from 67 to 97 plants.ha⁻¹ in all types of AFS (Table 5). In the Ctrad-Dlow and Ctech-Dmed types, the second most frequently associated plants were nitrogen fixing trees, *Erythrina poeppigiana* (15 plants.ha⁻¹) and *Gliricidia sepium* (16 plants.ha⁻¹), respectively. In the Ctrad-Dhigh type, after *Musaceae*, the most frequently associated species were fruit trees (Table 5), some of which were densely planted including orange trees (*Citrus aurantium*) with 48 plants.ha⁻¹ and the avocado trees (*Persea americana*) with 23 plants.ha⁻¹. Timber tree species were less common in the Ctrad-Dhigh type; the main species was *Roystonea hispaniola*, a palm tree native to the island that provides the wood used in the construction of rural dwellings. Finally, **Table 5** provides evidence for a gradient in the densification of associated plants from the Ctrad-Dlow type (low densities) to the Ctrad-Dhigh type (high densities).

The three types constructed by HCA can be distinguished from four structural variables: species richness, the density of the associated plants, density of the cocoa trees and the propagation mode for cocoa (Figure 17). The first two are at the origin of the **D** for "diversity" and "density" of associated plants (taking the modalities **low**, **med** for medium or **high**) which are found in the names of the types, the last two of the abbreviation **C** for "cocoa trees" (taking the modalities **trad** for traditional, and **tech** for technified i.e. with improved cocoa varieties). The Ctrad-Dlow type is characterized by cocoa trees planted at a relatively low density and mainly produced by the farmer himself/herself (Ctrad), as well as a rather low density and diversity of associated plants (Dlow). The Ctech-Dmed type is defined as cocoa trees planted at a relatively high density and produced by commercial nurseries offering improved varieties (Ctech), as well as the density and diversity of intermediate associated plants (Dmed). Finally, the Ctrad-Dhigh type is distinguished by cocoa trees planted at a relatively low density,

mainly produced by the farmer himself/herself (Ctrad), as well as a rather high density and diversity of associated plants (Dhigh).

Table 5. Decreasing density (plants.ha^{-1}) of the associated species in the three cocoa-based AFS types. The letters preceding the scientific names identify the functional group to which they belong: F for fruit tree species, N for nitrogen fixing species and T for timber trees.

Ctrad-Dlow			(Mean \pm SD)	Ctech-Dmed			(Mean \pm SD)	Ctrad-Dhigh			(Mean \pm SD)
F	Musaceae		67 \pm 38	F	Musaceae		97 \pm 67	F	Musaceae		86 \pm 59
N	Erythrina poeppigiana		15 \pm 10	N	Gliricidia sepium		16 \pm 25	F	Citrus aurantium		48 \pm 56
T	Roystonea hispaniolana		4 \pm 6	F	Citrus aurantium		12 \pm 14	F	Persea americana		23 \pm 19
F	Citrus aurantium		3 \pm 6	F	Persea americana		12 \pm 12	F	Coffea arabica		15 \pm 24
F	Coffea arabica		2 \pm 3	N	Erythrina poeppigiana		9 \pm 9	T	Roystonea hispaniolana		14 \pm 15
F	Artocarpus Communis		2 \pm 3	F	Pouteria sapote		6 \pm 9	F	Pouteria sapote		10 \pm 14
F	Mangifera indica		1 \pm 4	F	Mangifera indica		5 \pm 6	N	Erythrina poeppigiana		9 \pm 8
T	Ceiba pentandra		1 \pm 1	T	Roystonea hispaniolana		4 \pm 6	N	Gliricidia sepium		9 \pm 16
T	Licaria triandra		1 \pm 1	F	Coffea arabica		2 \pm 4	F	Citrus latifolia		8 \pm 12
F	Persea americana		1 \pm 4	F	Citrus reticulata		2 \pm 3	F	Artocarpus altilis		6 \pm 7
TOTAL			97 \pm 44	TOTAL			165 \pm 83	TOTAL			228 \pm 112

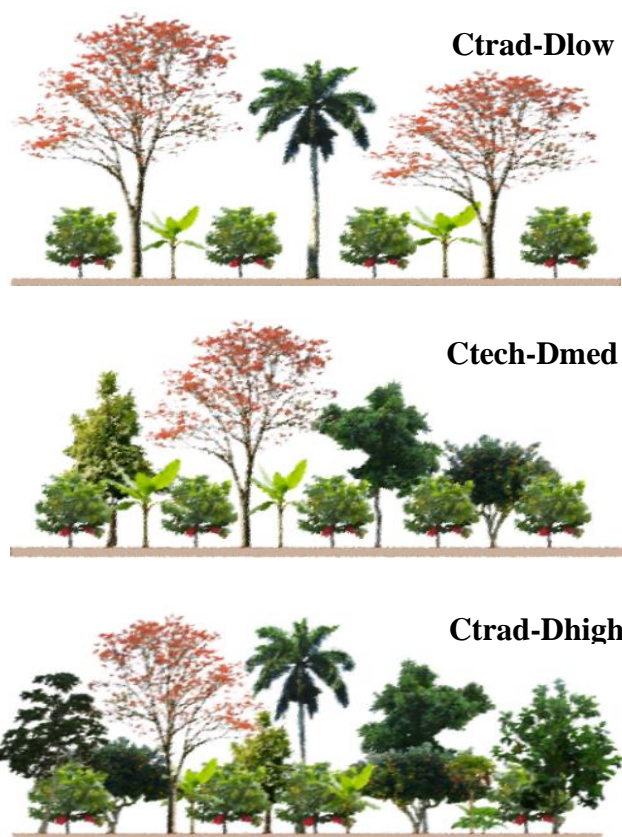


Figure 17. Typology based on the 140 cocoa-based AFS identified in three main production regions of the Dominican Republic, and characterized by the height, density and diversity of the cacao trees and associated plants, and propagation mode for cocoa.

II.3.2. Yields and economic performance in the three types of cocoa-based AFS

II.3.2.a. The products harvested and income generated by the three types of cocoa-based AFS

The total yields of products other than cocoa are not presented in this section because the yields of co-products are not always expressed in the same unit of measure: some are expressed as the number of fruits, others in regime (*Musaceae*), others even in "bucket" (limes, for example). We thus decided to analyze the yields of the 'other products' from an economic point of view.

Musaceae provided the highest OPI income (US\$153.ha⁻¹.yr⁻¹) in the Ctrad-Dlow type (Figure 18A), and the OPI income was poorly diversified in this type, with only US\$30.ha⁻¹.yr⁻¹ obtained from the sales of associated products. Finally, the main OPI incomes generated by the Ctrad-Dhigh type were from banana, avocado, orange and lemon sales (US\$50.ha⁻¹.yr⁻¹ each).

The three main self-consumed products harvested in cocoa-based AFS were banana (*Musaceae*), avocado (*Persea americana*) and mango (*Mangifera indica*), regardless of the type of cocoa-based AFS (Figure 18B). Other self-consumed products, such as *Citrus aurantium* (oranges), *Artocarpus altilis* (breadfruit), *Pouteria sapote* (sapota), contributed much less to the VDC income (< US\$50.ha⁻¹.yr⁻¹ each on average).

The income obtained from either the sale or the self-consumption of some fruits was not necessarily linked with the density of the corresponding fruit trees in the cocoa-based AFS. For example, mango trees were not common in the cocoa-based AFS and yet the mango fruit accounted for a large proportion of self-consumed products (Table 5 and Figure 18A).

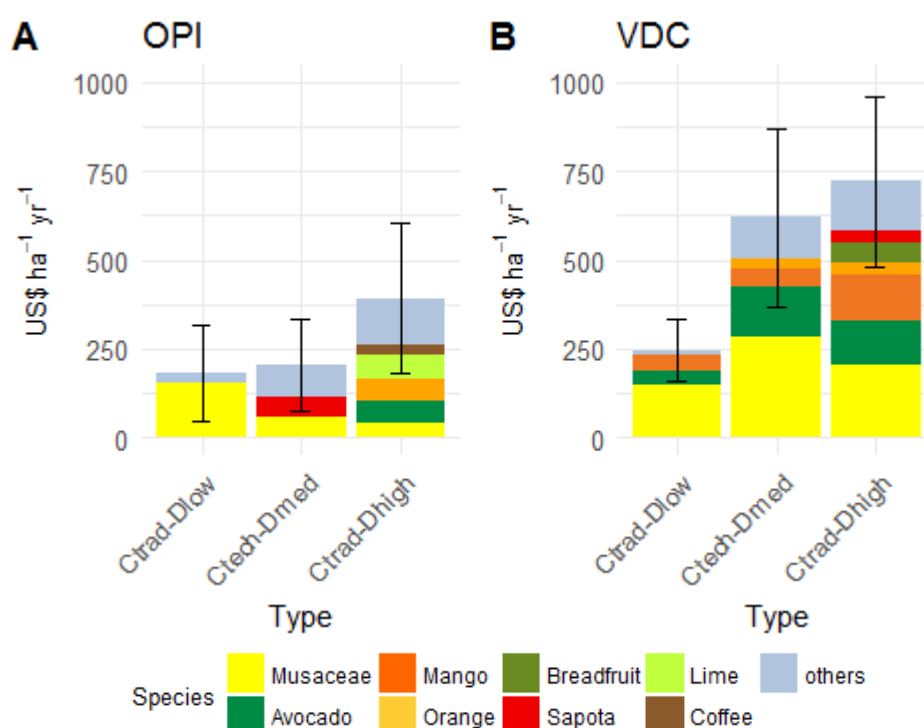


Figure 18. Contribution to the OPI (A) and VDC (B) incomes from the main products harvested in the three cocoa-based AFS types, in three main cocoa producing regions of the Dominican Republic.

The income from cocoa (CI) produced by the Ctrad-Dlow and Ctech-Dmed types was similar, US\$1,800.ha⁻¹.yr⁻¹ (Figure 19). Their CI was statistically higher than that of the Ctrad-Dhigh type which barely exceeded US\$1,000.ha⁻¹.yr⁻¹.

The income from other products (OPI) did not differ statistically among the three types, because of high intra-group variability. However, the average OPI provided by the Ctrad-Dhigh type tended to be twice as high as the two less diversified types at more than US\$400.ha⁻¹.yr⁻¹.

The VDC was significantly higher in the most diverse types, compared to the Ctrad-Dlow type.

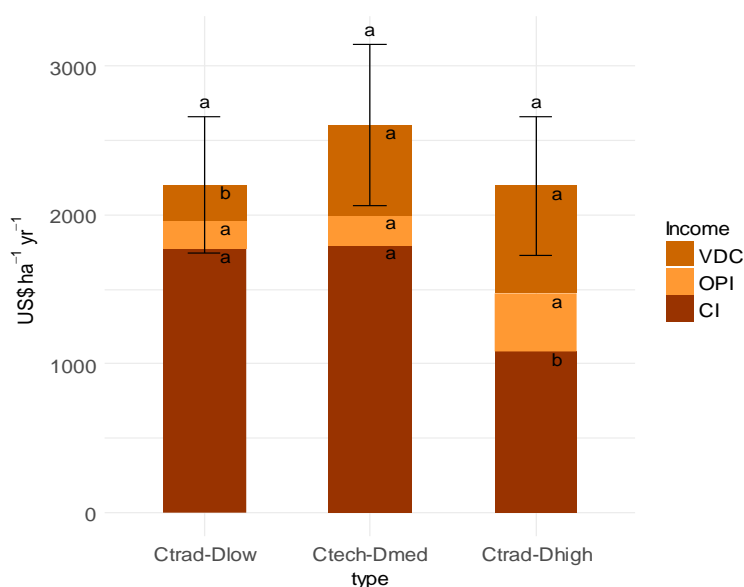


Figure 19. Bargraph representing sales (CI stands for income from cocoa, OPI for income from other products) and domestic consumption value (VDC) in the three types of cocoa-based AFS. The letters indicate significant differences (p -value<0.05) between types for each of the incomes (CI, OPI and VDC) and for the global income GI.

Finally, there was no significant difference in GI among the three types (Figure 19), although it tended to be higher on average in the Ctech-Dmed type (US\$2,620.ha⁻¹.yr⁻¹) than in the traditional types (US\$2,200.ha⁻¹.yr⁻¹).

The contribution of income from cocoa to the GI decreased with an increase in the diversity and density of the associated plants. This contribution was 80% of the GI for the Ctrad-Dlow type, 69% of the GI for the Ctech-Dmed type, and less than 50% of the GI for the Ctrad-Dhigh type.

II.3.2.b. Determinants of associated plant diversity and economic performances

Despite 15 years difference in the average age of the plots, Ctech-Dmed and Ctrad-Dlow cocoa-based AFS produced similar cocoa yields, and these were significantly higher than the yields obtained from Ctrad-Dhigh (**Table 6**). These higher cocoa yields resulted in higher CIs than in the Ctrad-Dhigh type (**Figure 19**). The basal area of the cocoa trees was also significantly larger in these two types than in the Ctrad-Dhigh type.

The diversity of products in the Ctrad-Dhigh cocoa-based AFS was at least twice higher than in the other two types (**Table 6**), and therefore tended to generate a higher OPI (**Figure 18A**). The same was true of self-consumed products, the VDC generally came from six different species in the Ctrad-Dhigh type while it came from only three species in the Ctech-Dmed type and from two species in the Ctrad-Dlow type (**Table 6**).

Table 6. Variables describing the economic performance of each cocoa-based AFS type. yC: dry cocoa yield; ageC: average age of the cocoa trees; StC: average basal area of the cocoa trees; NbPS: number of associated plant species whose products are sold; NbPC: number of associated plant species whose products are self-consumed. Comparisons among AFS types were performed using permutation Student's tests. Significant differences (p -value < 0.05) are indicated by different letters (a, b, c).

Variable	Unit	Ctrad-Dlow Mean +/- SD		Ctech-Dmed Mean +/- SD		Ctrad-Dhigh Mean +/- SD	
yC	kg.ha ⁻¹ .yr ⁻¹	820 ±346	a	755 ±316	a	475 ±232	b
ageC	years	38 ±14	a	23 ±8	b	30 ±14	ab
StC	m ² .ha ⁻¹	2 ±0.6	a	1.5 ±0.6	b	0.9 ±0.4	c
NbPS	unit	0.8 ±1	b	0.9 ±0.9	b	2.2 ±1.9	a
NbPC	unit	2.1 ±1.1	c	3 ±1.3	b	6.1 ±2.8	a
A	ha	2.2 ±1.8	a	1.2 ±1.1	ab	1.0 ±0.7	b

Finally, the average size of the cocoa field, where measurement plots were installed, decreased significantly between the Ctrad-Dlow (2.2 ha) and the Ctrad-Dhigh (1.0 ha) types, with an increase in the diversity of the associated plants (**Table 6**).

II.3.3. Relationships between density, diversity and global income

An increase in associated plant density was not always linked with an increase in associated plant diversity: the observed correlation between specific richness and associated plant density was low ($R^2 = 0.27$).

The global income (GI), which reaches US\$2,404.ha⁻¹.yr⁻¹ in average, was not correlated with species richness or with the density of the associated plants. But the upper points of the grey area in the graph in Figures 20A and 20B indicate that GI tended to be higher when the species richness and density of the associated plants were moderate, ranging from three to seven species and 100 to 400 plants.ha⁻¹, respectively. The points above the dotted line and in the grey area belong mainly to the Ctech-Dmed type and less to the Ctrad-Dlow and Ctrad-Dhigh types: 38% of the sample against 15% and 20% respectively (Figure 20A) and 42% of the sample against 25% and 24% respectively (Figure 20B). Analysis of the characteristics shared by these seven situations that produced a highest income, showed that the plots were very small, (average 0.7 ha), with 85% of the cocoa trees were improved varieties and planted at a density of 750 cocoa trees per hectare. As the other structural variables varied considerably in the seven situations (musaD, timberD, fruitD and fixND or tree height), they may not have influenced income in a generalizable way. It is also important to remind that the profit obtained from these seven remarkable situations was not from the sale of timber, but only from the sale and self-consumption of cocoa and "fruit products".

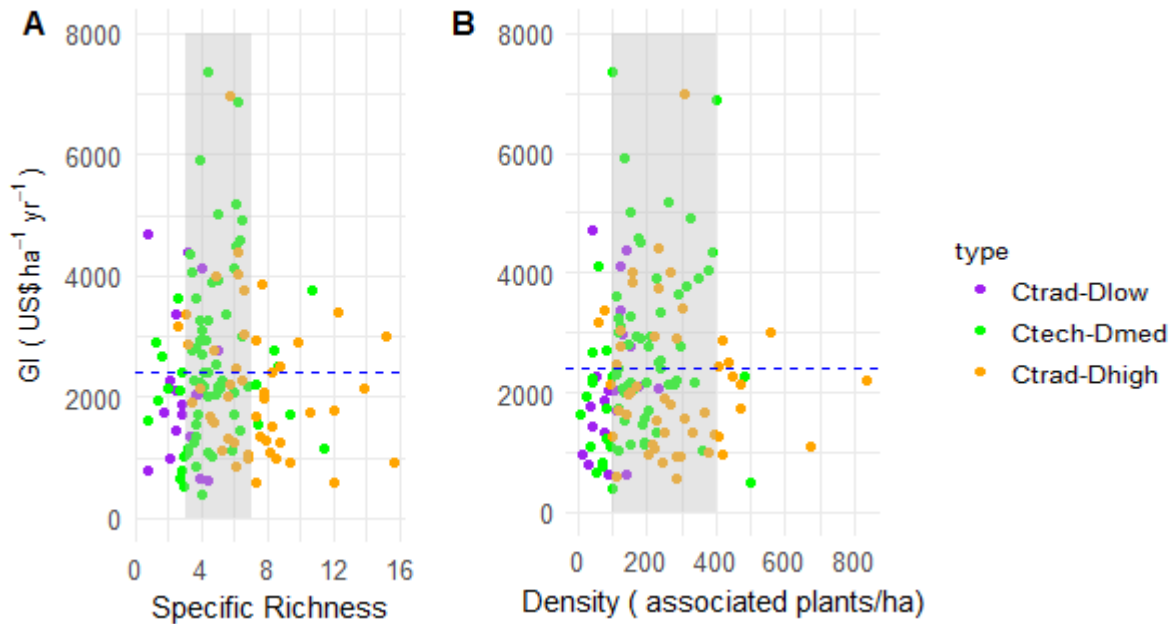


Figure 20. Global income GI ($CI + OPI + VDC$) generated by a sample of 140 cocoa-based AFS according to the species richness per 1,000 m^2 (A) and the density per ha (B) of plants associated with cacao trees in three types of cocoa-based AFS in the Dominican Republic. The grey area represents the interval in which the highest GI are observed. The dotted line indicates the average GI of the entire sample.

II.4. DISCUSSION

II.4.1. Cocoa-based AFS with contrasted structural patterns

From the 140 plots surveyed (that accounted for a total of 14 ha) in three main cocoa production basins in the Dominican Republic, 54 plant species associated with cocoa trees were recorded, which is not many compared to the 127 species identified in 10 ha prospected in Colombia (Suarez Salazar *et al.*, 2018b), but similar to the results obtained in Nigeria or Guatemala with 45 and 47 species recorded in 21 ha and 7.2 ha, respectively (Oke and Odebiyi, 2007; Salgado-Mora *et al.*, 2007). Among our three types of cocoa-based AFS, cocoa tree density ranged from 658 to 880 trees. ha^{-1} , which is relatively high compared to densities observed in Costa Rica, i.e. 543 trees. ha^{-1} (Deheuvels *et al.*, 2012) but much lower than those measured in Cameroon with 1,640 trees. ha^{-1} on average (Jagoret *et al.*, 2011). The density of associated plants in the Ctrad-Dlow type was 100 plants. ha^{-1} on average, which is close to the 120 plants. ha^{-1} measured in Cameroon (Jagoret *et al.*, 2011). The Ctrad-Dhigh type had 281 plants. ha^{-1} on average, which is slightly below the 350 plants. ha^{-1} measured in Costa Rica (Deheuvels *et al.*, 2012). In conclusion, the Dominican cocoa-based AFS showed comparable average cocoa and associated plant densities and diversity to other cocoa-based AFS around the world.

Regarding plant height, the positive correlation shown by the PCA between the height of cocoa trees and that of the associated plants can be explained the cocoa trees' need for more light. Indeed, the tallest associated plants often were *Erythrina poeppigiana* trees whose dense canopy provided dense shade for the cocoa trees. Ctrad-Dlow type had taller cocoa trees and associated plants than the other two types, particularly than Ctrad-Dhigh. However, in the latter type, most associated plants were fruit trees, which are barely higher than the cocoa trees. Furthermore, pruning practices are scarce. Cocoa trees from Ctrad-Dlow type are older than in the other two types, which could explain their higher average height. This explains the negative correlations between fruit trees density and the average height of (i) the associated trees and (ii) the cocoa trees.

The positive correlation between fruit tree density and the species richness of associated plants here reflects a strategy for the diversification of fruit products for self-consumption (Degrande *et al.*, 2006), rather than a market oriented strategy. This particularly applies to the Ctech-Dmed and Ctrad-Dhigh types.

The negative correlation between the cocoa tree density and the proportion of cocoa varieties selected on-farm can be interpreted as follows: farmers who receive technical advice on how to increase their cocoa yield - at least those who are most receptive to the advice - usually apply standard recommendations based on (i) densification of the cocoa tree population to get as close as possible to the standard density of 1,111 cocoa trees.ha⁻¹, (ii) a renovation process of the cocoa tree population with improved cocoa varieties provided by local research centers. Farmers of the Ctech-Dmed type appear to be more sensitive to these recommendations because in this group we observed a very high proportion of improved cocoa varieties and a higher density of cocoa trees in the AFS than in the other two types.

II.4.2. Yield and economic performances of cocoa-based AFS related to their structure

The Dominican cocoa-based AFS showed significant variability in the diversity and density of plants associated with cocoa trees. The diversity of associated plants has a direct impact on the diversity and quantity of products harvested and sold. Nevertheless, cocoa production explained most of the generated income and the contribution of other products remained marginal, except in the Ctrad-Dhigh type in which half of the global income was generated by the sales and self-consumption of other products.

The average cocoa yield in our study was 666 kg.ha⁻¹.yr⁻¹ and was correlated with the basal area of cocoa trees (Table 6) as already reported by Jagoret *et al.* (2017a). This yield was higher (Gockowski *et al.*, 2004; Deheuvels *et al.*, 2012; Jagoret *et al.*, 2012) or sometimes equivalent (Somarriba and Beer, 2010; Abdulai *et al.*, 2018a) to cocoa yields reported in a wide range of cocoa-based AFS around the world. For instance in Central America, Cerda *et al.* (2014) showed that a slightly lower average density of cocoa trees (600 trees.ha⁻¹) and a higher average density of associated plants (287 plants.ha⁻¹) than observed in our sample, provided a much lower cocoa yield (243 kg.ha⁻¹.yr⁻¹). The relatively high cocoa yield observed in our study is partly due to the geographical location of the Dominican Republic, an island state that currently remains untouched by major cocoa fungal diseases such as *Moniliophthora roreri* and *Moniliophthora perniciosa* (Batista, 2009a) that have caused extremely severe yield losses in Central and South America (Phillips-Mora *et al.*, 2007; Meinhardt *et al.*, 2008).

The sales of the associated products from cocoa-based AFS accounted for up to 20% of the total farm income of cocoa farmers in Central America (Cerda *et al.*, 2014), which is in the range of our 10 to 26% estimates at field scale. However, self-consumption (VDC) was higher in Central America (US\$827.ha⁻¹.yr⁻¹) than in our sample (US\$596.ha⁻¹.yr⁻¹).

In Costa Rica, Salazar-Díaz and Tixier (2017b) showed that when the diversity of associated timber trees and fruit plants increased, the estimated overall profitability of cocoa-based AFS also increased: yields decreased in the lower stratum composed of cocoa and banana trees, but the yields from taller fruit trees and timber trees more than compensated for the reduction in the yields of the lower stratum. However, the aforementioned study was based only on potential and not on actual returns. Here we show that, beyond a certain threshold of associated diversity (>7 species) and density (>400 plants.ha⁻¹), the strategy of diversifying the products to be sold in order to increase income does not pay off (**Figure 20**). In our study, which was based on data declared by the farmers, cocoa tree productivity was also reduced by high densities of associated plant, as reported by Jagoret *et al.* (2017c). In addition, the Ctrad-Dhigh type proved that lower cocoa yields are not offset by the sales of associated products,

as these products are either too few or of no commercial value. The hypothesis of a significant difference in average global income between the Ctech-Dmed type and the other two types was not confirmed, but the former remained the type with the highest maximum global income (GI). There was therefore little tradeoffs among cocoa-based AFS total productivity and the diversity and density of associated plants beyond a certain threshold, i.e. among provisioning services and the support or regulation services that can be associated to high biodiversity, as described by Rapidel *et al.* (2015) and Saj and Jagoret (2017). By applying the same analysis as that developed by Cerda *et al.* (2017) and Andreotti *et al.* (2018), we can define optimal situations for the provision of ecosystem services. An intermediate level of diversity and density of associated species, and certainly appropriate management of these species, makes it possible to obtain acceptable yields and to value the different products, as was the case with some cocoa-based AFS of the Ctech-Dmed type (Figure 21).

The average density of fruit plants recorded in our sample was 169 plants.ha⁻¹, while it was only 77 fruit plants.ha⁻¹ in Central America (Cerda *et al.*, 2014) but reached 702 fruit plants.ha⁻¹ (90% of *Musaceae*) in some areas of Costa Rica (Salazar-Díaz and Tixier, 2017). This combination of cocoa trees with fruit plants, particularly of the *Citrus* genus, at a relatively high density, does not appear to be economically successful in the Dominican Republic. This lack of expected income from the sales of associated fruits can be explained by four separate or combined factors: (i) low yields due to competition for soil nutrients or light (Beer, 1987), (ii) low yields due to poorly managed or aging fruit trees, (iii) fruits that are not harvested because of their low commercial value (Leakey *et al.*, 2005) and/or non-existent, inaccessible or unprofitable markets (Anderman *et al.*, 2014). However, the combination of food plants at high densities provides and secures a diversified diet for the household, whose nutritional value has been poorly studied so far. Finally, timber trees are only rarely associated with cocoa trees and their timber is rarely traded, mostly because the farmers are not aware of the necessary legal paperwork or it is too much for them to manage. The sale of softwood lumber, which is subject to administrative formalities that are not well known to farmers, could produce potentially high additional revenues (Dubon and Sanchez, 2007; Somarriba and Beer, 2010).

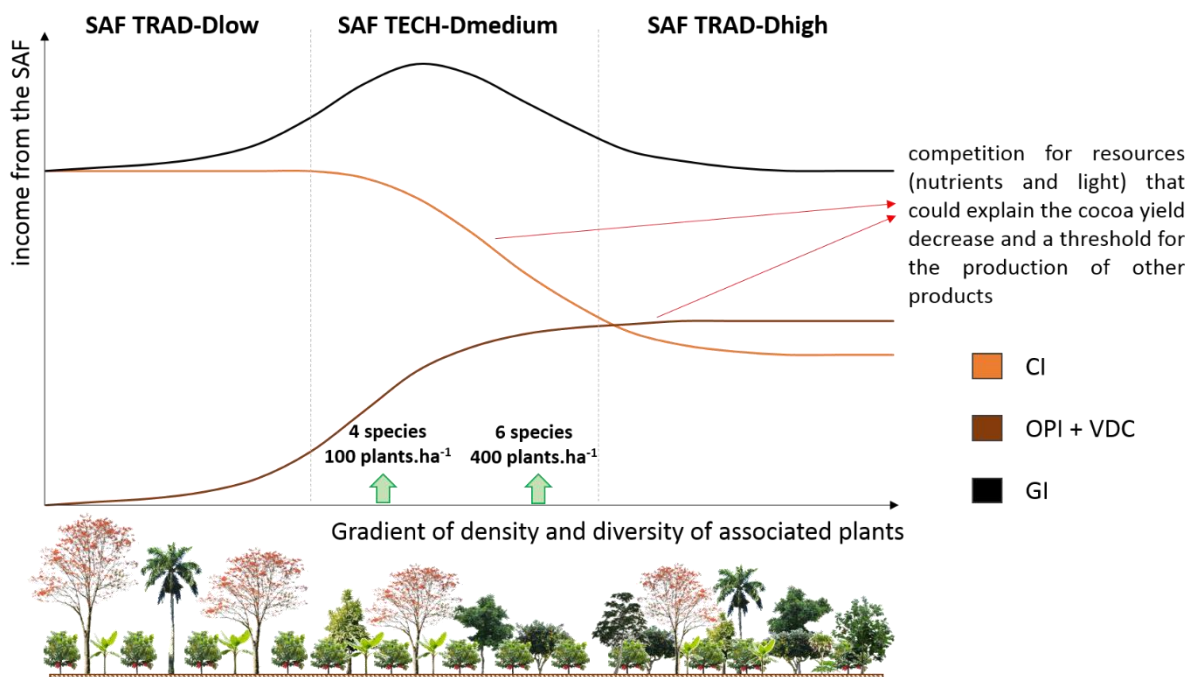


Figure 21. Changes in income along a gradient of density and diversity of plants associated with cocoa trees in AFS: CI: cocoa income, OPI: income from other products, VDC: value of domestic consumption and GI: for global income.

More than 67% of the cocoa-based AFS belonging to the Ctrad-Dhigh type were found in the San Cristobal province, making this type emblematic of this specific region. The Duarte and El Seibo provinces are the historical cocoa growing areas, where significant resources (infrastructure, technical assistance) were invested in the late 1960s (National Cocoa Commission – Personal communication), while cocoa farming in the San Cristobal province started more recently. Cocoa trees have gradually replaced the Citrus crops devastated by hurricanes David (1979) and Georges (1998) (Local farmers - Personal communication). Farmers then began planting cocoa trees in the spaces opened in their plots where the hurricanes uprooted citrus trees. The history of Dominican cocoa farming therefore partly explains the differences in composition and structure between the Ctrad-Dhigh type and the other two types, as well as the differences in economic performance. In addition, Huanglongbing disease (HLB), responsible for the progressive and drastic decline of Citrus productivity (Gottwald, 2007), appeared in the Dominican Republic in 2002 (FERSAN, 2009). This disease is probably responsible for the very low yields and consequently for the poor marketability of citrus fruits grown in the AFS.

II.4.3. Need for farm-scale studies

We estimated the income provided by AFS at farm scale through the annual gross income per capita (GIC) by assuming that the total farm area was covered by SAF (which in practice was the case of 44% of the farms in our study). GIC was much higher in the Ctrad-Dlow than in the Ctrad-Dhigh type because the total AFS area was three times larger in the Ctrad-Dlow type than in the Ctrad-Dhigh type, and the GIC in the Ctech-Dmed type was intermediate between the two.

Farmers whose income depended only on cocoa-based AFS were in the majority in all three types, the number ranged from 50 to 65%. According to the statistics provided by the Dominican National Bank (ONE, 2016a), in 2016, the poverty line in the Dominican Republic was 1,115 US\$.yr⁻¹.pers⁻¹. Based on these data, at least 42% (Ctrad-Dlow) to 56% (Ctrad-Dhigh) of the farmers living solely on cocoa-based AFS in our sample should be living below the poverty line. Therefore, despite a higher GIC for the Ctrad-Dlow and Ctech-Dmed types, because of high intratype GIC variability, poverty not only affects farmers of the Ctrad-Dhigh type. However, the smaller the total cocoa-based AFS area of the farm, the more severe the poverty.

If we had included the cost of inputs, the crop diversification strategy of the Ctrad-Dhigh type would perhaps have been as economically profitable, if not more so, than the other two types (Michler and Josephson, 2017). Indeed, small cocoa-based AFS can be more easily managed by the farmer and his family without the need to hire additional outside labor (Jezeer *et al.*, 2017). What is clear is that if we had taken production costs into consideration, the poverty level of farmers and their families would have been even more severe than estimated in the previous paragraph. At last, a comprehensive analysis of profitability at farm scale should also consider all other economic activities than cocoa production.

II.5. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

In conclusion, the gradient in density and in the diversity of associated plants that distinguishes Dominican cocoa-based AFS influences the origin, type and level of economic performance at field scale. The diversification of AFS structure did not necessarily lead to an increase in income. However, a general scheme can be recommended to improve the income and self-consumption generated by cocoa-based AFS. The scheme based on moderate density and diversity of associated plants (100 to 400 plants per hectare using from three to seven different species) would potentially ensure relatively high sales of cocoa and other products and relatively high self-consumption of other products. Also, effective rehabilitation of the cocoa-based AFS, by replacing dead or unproductive cocoa trees and

associated plants with genetically selected varieties would probably be sufficient to significantly increase the income produced by these cultivated ecosystems.

Studies should be conducted at farm scale to identify other levers to improve family income, reduce poverty rate and make cocoa production in the Dominican Republic attractive again.

II.6. UN BESOIN PRESSANT D'INNOVER POUR SOLUTIONNER

On distingue une différence importante de la surface de l'ensemble des SAF de l'exploitation agricole entre les trois types (Tableau 7). Cette surface est décroissante suivant la diversité des plantes associées, avec des moyennes significativement différentes entre le type Ctrad-Dlow et Ctrad-Dhigh. Le type Ctrad-Dhigh ne détient que 2.2 ha de SAF en moyenne, alors que le groupe de Ctrad-Dlow en possède presque le triple (Tableau 7). Etant donné qu'il n'y a pas de différence significative concernant le nombre de personnes vivant des revenus de l'exploitation entre les 3 groupes, seuls les rendements et la surface agricole utilisée impactent le chiffre d'affaire par an *per capita* de chaque type. Par conséquent, le type Ctrad-Dhigh génère un chiffre d'affaire de seulement 1365 US\$.an⁻¹ *per capita* tandis que les 2 autres groupes se situent au-dessus des 3000 US\$.an⁻¹ *per capita*, majoritairement grâce aux rentes générées par la vente de cacao, avec pour le type Ctech-Dmed un apport non négligeable des produits autoconsommés (Figure 19).

Parmi les trois types, les producteurs vivant exclusivement des SAF et des revenus qu'ils génèrent sont majoritaires, entre 60 et 69%. Cela montre un manque de diversification des activités au sein des exploitations agricoles et donc une certaine vulnérabilité. D'après les statistiques de la banque nationale (ONE, 2016a), le revenu limitant le seuil de pauvreté était fixé à 1115 US\$.an⁻¹ *per capita* en 2016. En analysant la situation économique des producteurs n'ayant comme activité de génération de revenu que les SAF, on s'aperçoit que la pauvreté ne touche pas que certains producteurs du type Ctrad-Dhigh, même ceux des deux autres groupes sont impactés et cela à cause d'une forte variabilité intratype du GIC. Toutefois, plus on diminue la surface totale de SAF, plus la problématique de pauvreté est forte (Tableau 7).

Tableau 7. Variables explicatives du niveau de pauvreté de chaque type : PàC le nombre moyen de personnes à charge par exploitation Surf-SAF la surface totale moyenne en SAF par exploitation agricole, GIC le gain moyen *per capita*.

Variable	Unité	Ctrad-Dlow (n = 20)		Ctech-Dmed (n = 71)		Ctrad-Dhigh (n = 49)	
PàC	Nombre de personne	4.1 (±1.5)	-	3.5 (±1.4)	-	3.5 (±1.3)	-
Surf-SAF	ha	6.4 (±5.1)	a	3.8 (±3.7)	ab	2.2 (±1.3)	b
GIC	US\$.an ⁻¹ per capita	3095 (±2225)	a	3550 (±3899)	a	1365 (±850)	b
Part de producteurs sans autre activité que les SAF	%	60% (12 producteurs)		69% (49 producteurs)		65% (32 producteurs)	
Part de producteurs sans autre activité que les SAF vivant sous le seuil de pauvreté	%	42% (5 producteurs)		45% (22 producteurs)		56% (18 producteurs)	

Cette part relativement importante de ménages tirant leur revenu de la cacaoculture et vivant sous le seuil de pauvreté montre à quel point la problématique est forte et que des améliorations dans les SAF doivent être trouvées rapidement. Cette situation nous a tout d'abord conduit à élaborer et appliquer une méthodologie de conception participative de SAF innovants incluant des acteurs locaux de la filière dans l'espoir de faire émerger des innovations pouvant rapidement être acquises et implémentées par les producteurs (cf. Chapitre III). Par ailleurs, nous avons souhaité affiner notre compréhension du fonctionnement des SAF, en analysant à l'échelle du cacaoyer, les facteurs environnementaux explicatifs de sa productivité (cf. Chapitre IV). Cette démarche permet elle aussi d'imaginer des innovations et d'élaborer des SAF innovants décrits et comparés avec les SAF innovants co-conçus dans le Chapitre V.

CHAPITRE III. ELABORATION ET TEST D'UNE METHODE PARTICIPATIVE INNOVANTE DE CONCEPTION DE SAF AGROECOLOGIQUES COMPLEXES A BASE DE CACAOYERS

III.1. INTRODUCTION

Historiquement, l'agriculture a toujours connu des transformations de ses pratiques pour atteindre des objectifs de performance afin de nourrir en quantité suffisante les populations et plus récemment pour répondre à des attentes environnementales (Faure *et al.*, 2009). Les innovations agricoles peuvent provenir d'approches et de milieux divers : des agriculteurs eux-mêmes, des industries para-agricoles, d'instituts techniques ou bien de la recherche (Reau and Doré, 2008a). Cependant, la communication et le transfert de ces innovations se font difficilement. L'approche « top-down » encore opérée aujourd'hui par les organismes prodiguant du conseil technique a montré ses limites (Faure *et al.*, 2009). Les recommandations techniques ne sont pas appliquées ou bien mettent du temps avant d'être acceptées par les agriculteurs. Une nouvelle approche pour mettre au point des innovations qui soient appliquées rapidement par les agriculteurs a émergé dans les années 1990 avec les travaux de prototypage (Vereijken, 1997). Cette méthode se base sur l'interaction entre agriculteurs et chercheurs qui, en mettant en commun leurs connaissances théoriques et pratiques, apportent des innovations en élaborant des prototypes de nouveaux systèmes de culture pour répondre à une problématique agricole donnée. Ces prototypes sont évalués expérimentalement, ce qui permet de les améliorer si nécessaire dans un nouveau cycle de conception (Rapidel *et al.*, 2009; Le Bellec *et al.*, 2011; Husson *et al.*, 2015). Depuis, des améliorations ont été introduites, notamment pour mesurer *a priori* le niveau de réussite attendu des prototypes grâce à des méthodes d'évaluation *ex ante* via de la modélisation comme APSIM (Keating *et al.*, 2003) et BANAD (Blazy *et al.*, 2010) ou via des outils d'analyse multicritère comme MASC (Sadok *et al.*, 2009; Ravier *et al.*, 2015) ou DEXiPM (Pelzer *et al.*, 2012) par exemple. Cette évaluation *ex ante* sert à tester les performances agro-environnementales et socio-économiques, les piliers du développement durable, d'un nombre élevé de systèmes de culture innovants (Sadok *et al.*, 2008; Deytieux *et al.*, 2016). Son utilisation lors des ateliers participatifs facilite la prise de décision finale sur les innovations sociotechniques à mettre en œuvre pour assurer de meilleurs niveaux de fourniture de services écosystémiques par les systèmes de culture innovants. Cela permet *in fine* de présélectionner le ou quelques-uns des système(s) de culture innovant(s) le(s) plus performant(s) suivant les objectifs définis afin de le(s) tester au champ. Ces méthodes de conception participative ont émergé pour traiter les objectifs parfois contradictoires de différents acteurs, en réponse à des enjeux écologiques dans des contextes de dégradation de l'environnement ou de gestion conflictuelle de ressources naturelles. Elles ont été pensées et mises en application dans le but d'améliorer les services en lien avec l'agriculture comme la qualité de l'eau, la formation du sol, le stockage de carbone, le recyclage des nutriments, etc. tout en maintenant une rentabilité économique du système agricole.

Sur l'île d'Hispaniola, les systèmes de culture à base de cacaoyers de République Dominicaine se présentent exclusivement sous la forme de systèmes agroforestiers (SAF). Les cacaoyers sont donc cultivés en association avec des espèces, ligneuses ou non, pouvant éventuellement produire des fruits et du bois commercialisés ou autoconsommés par les familles de producteurs, et fournissant de nombreux autres services écosystémiques (Malézieux *et al.*, 2009). En 2017, des 152 260 ha de SAF à base de cacaoyers, 84 500 ha (55%) étaient cultivées sous certification de l'agriculture biologique (communication personnelle de la *Comisión Nacional de cacao*). Par ailleurs cette même année, 48% de la production nationale était certifiée bio, ce qui classe le pays en 1^{ère} position mondiale de production de cacao bio (Lernoud *et al.*, 2018). Cette situation s'explique par le positionnement géographique du pays : son insularité a permis le maintien d'une faible pression en bioagresseurs vis-

à-vis des cacaoyers (champignons comme ravageurs), les maladies ayant été stoppées par les barrières maritimes (océan Atlantique et mer des Caraïbes). Les producteurs dominicains n'utilisent donc pas de pesticides puisqu'ils n'en ont pas besoin. La gestion des cacaoyers pour les producteurs certifiés consiste principalement à égourmander et récolter les cacaoyers, ainsi qu'à désherber mécaniquement les parcelles quand la pression en adventices devient élevée (Batista, 2009a). Les rendements moyens obtenus sont plutôt bons comparés à d'autres pays du continent américain ou d'Afrique, mais étant donné le coût élevé de la vie en République Dominicaine, plus du tiers des ménages vivant de la cacaoculture restent sous le seuil de pauvreté (Notaro et al, 2019).

Nous avons mené en République Dominicaine un projet de conception participative de SAF sous forme de prototypes, c'est-à-dire des SAF innovants qui seront ensuite testés en conditions réelles sur de petites surfaces (0,25 ha). Ce travail est allé au-delà d'une recherche de compromis entre productivité et réduction d'intrants chimiques comme cela est souvent le cas dans les exemples de co-conception en agriculture conventionnelle (Reau and Doré, 2008a) puisque nous avons travaillé dans le cadre de l'agriculture biologique. Il s'est essentiellement basé sur les principes de l'agroécologie : trouver des innovations qui favorisent au maximum les processus écologiques tout en améliorant la productivité du système agricole et par conséquent sa performance économique. Ces processus écologiques impliquent des interactions diverses et variées entre composantes de l'écosystème, à différentes échelles temporelles et spatiales. En cacaoculture agroforestière plus que dans des systèmes de culture moins complexes, ces processus sont plus nombreux puisqu'il s'agit de systèmes de culture plurispécifiques où l'on observe une diversité d'espèces cultivées bien plus élevée et dont les densités varient parfois fortement (Jagoret *et al.*, 2011; Deheuvels *et al.*, 2012; Suarez Salazar *et al.*, 2018a). C'est pourquoi l'accent est mis sur la composition spécifique et l'organisation spatiale des SAF à concevoir. Nous avons élaboré une méthodologie originale de conception participative impliquant des professionnels variés de la filière cacao. Elle a abouti à la mise au point de quatre prototypes, ou parcelles expérimentales innovantes, de SAF. La méthode, les résultats intermédiaires à chaque étape de conception ainsi que les prototypes finaux sont décrits dans cet article.

III.2. MATERIEL ET METHODES

III.2.1. Localisation

Deux zones contrastées par rapport à la structure des SAF ont été sélectionnées pour y mener les ateliers de conception participative : la province de Duarte au nord de la République Dominicaine qui est la zone principale et historique de production de cacao avec 55,606 ha soit 36,5% de la surface nationale cultivée en cacao, et la province de San Cristobal au sud qui est une zone où la cacaoculture est plus extensive avec 2,548 ha soit 1,7% de la surface nationale cultivée en cacao (Deheuvels, 2015) (Figure 22). Sur la zone de Duarte, on observe une densité et une diversité moyenne des plantes

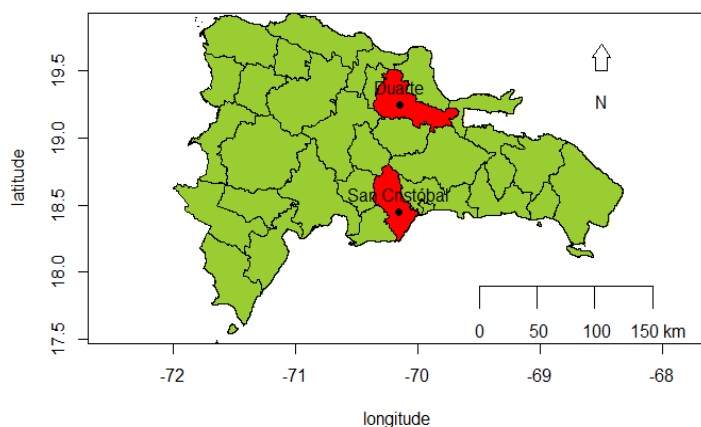


Figure 22. Carte de la République Dominicaine et délimitation de deux provinces sélectionnées (en rouge).

associées moins importante que dans la zone de San Cristobal, ainsi qu'une majorité de cacaoyers ayant été produits en pépinière (Notaro *et al.*, 2019). La zone de Duarte est donc plus centrée sur la culture du cacao dont la densité de plantation est plus élevée.

III.2.2. Choix des participants

Des participants aux connaissances et savoir-faire de différentes origines (milieu agricole, scientifique ou technique) ont été conviés afin d'enrichir les discussions et débats et assurer une meilleure acceptation des innovations par les producteurs puisqu'ils sont directement impliqués dans le processus de conception (Voinov and Bousquet, 2010).

La conception participative s'est faite via la formation de deux groupes séparés : le premier étant composé des producteurs et le second étant formé des techniciens et des enseignants-chercheurs. Une telle organisation facilite la prise de parole des producteurs qui se sentent alors plus à l'aise pour échanger leurs points de vue entre pairs. Mélanger tous les participants dès le début du processus aurait certainement bridé la parole des participants aux connaissances empiriques par rapport à ceux aux connaissances académiques (Faure *et al.*, 2009). Les quatre groupes, constitués d'une quinzaine de participants chacun, ont été intitulés « producteurs de la province de San Cristobal » (PSC), « techniciens de la province de San Cristobal » (Clough *et al.*), « producteurs de la province de Duarte » (PD) et « techniciens de la province Duarte » (TD). Afin d'enrichir les discussions lors des ateliers, des producteurs aux pratiques variées de gestion des espèces associées des SAF, donc dont les SAF sont structurellement contrastés, ont été sollicités. Ils ont été sélectionnés dans les différents groupes de la typologie des SAF dominicains (Notaro *et al.*, 2019) construite sur un gradient de densité et de diversité des plantes associées.

Par ailleurs, du fait que plus de 55% des SAF dominicains sont certifiés en agriculture biologique, les producteurs conviés au processus étaient tous certifiés en bio pour la production du cacao. Aussi, les techniciens invités provenaient de coopératives elles-mêmes en partie financées par les certificateurs en bio des parcelles de producteurs, et fournissant en cacao des entreprises préoccupées par la durabilité de ce secteur.

III.2.3. Les différentes étapes du processus de conception participative

La méthode mise en œuvre (Tableau 8) a pu aboutir à un prototype par groupe, soit quatre au total, après huit réunions par groupe, chacune d'entre elles ayant lieu sur une matinée (durée de 3 à 4h). L'ensemble de ces réunions peuvent être regroupées dans trois étapes clés :

Etape 1- Les trois premières réunions ont posé les bases utiles à la co-conception puisque les participants y ont explicité les états biophysiques souhaités des SAF.

Etape 2 - Les trois suivantes ont porté sur la sélection des espèces (voire des variétés) associées aux cacaoyers et sur les pratiques à choisir pour leur gestion.

Etape 3 - L'avant dernière réunion a consisté en la simulation des performances économiques pour voir si les choix opérés précédemment sont suffisants pour garantir un revenu acceptable relativement à l'objectif fixé. Enfin la dernière réunion était l'occasion pour les deux groupes de chaque zone de se réunir pour comparer leurs prototypes proposés et faire un dernier ajustement si nécessaire.

Dans la partie de résultats de l'étape 2, l'estimation du temps de travail nécessaire et du coût des intrants (main d'œuvre et outils) pour la réalisation des différentes pratiques de gestion des prototypes (dont leur biodiversité cultivée) n'est pas présentée en détail. Seule l'estimation du coût total annuel est affichée dans les graphiques de projection économique des prototypes afin d'alléger le contenu. Cela permet de présenter plus largement la conception « structurelle » des prototypes.

Tableau 8. Tableau récapitulatif des différentes étapes de conception, de leurs enjeux et des supports utilisés au cours des ateliers. Pour chaque enjeu, la référence au Matériel et Méthodes (M&M) correspondant ainsi que la date à laquelle l'atelier a eu lieu par groupe sont indiquées.

Etape	Enjeu	Support	M&M	Date de réunion par groupe			
				PSC	TSC	PD	TD
(1) Détermination du cadre conceptuel	Explication de la problématique et des objectifs	-	2.4	23/08/17	21/08/17	18/10/17	17/10/17
	Description des états souhaités et des fonctions associées	Dessins et sorties en parcelles	2.5	30/08/17	28/08/17	25/10/17	24/10/17
	Hiérarchisation de ces fonctions (ou services)	Méthode de Sheil	2.6	06/09/17	04/09/17	01/11/17	31/10/17
(2) Formalisation technique	Choix des espèces (et variétés)	Méthode de Sheil et consensus	2.6	13/09/17	11/09/17	08/11/17	07/11/17
	Agencement des espèces dans l'espace et choix des densités de plantation	Jeu de schématisation de prototype	2.7	20/09/17	18/09/17	22/11/17	21/11/17
	Sélection des techniques de gestion des espèces et plus globalement du système de culture	Tableau Excel	2.8	27/09/17	25/09/17	29/11/17	28/11/17
(3) Evaluation ex ante	Projections économiques pour voir si les objectifs peuvent être atteints	Tableau Excel	2.8	04/10/17	02/10/17	06/12/17	05/12/17
	Partage entre groupe de chacun de leur prototype et confrontation de points de vue	Présentation PowerPoint	2.9	09/10/17		12/12/17	

Des photos d'illustration des ateliers de co-conception prises lors des Etapes 1 et 2 (Tableau 8) sont disponibles en Annexes 5 et 6.

III.2.4. Objectifs

L'objectif principal, moteur du processus de co-conception, est l'augmentation significative des revenus tirés des SAF, car nombreuses sont les familles de producteurs de cacao vivant très modestement et vulnérables (Berlan and Bergés, 2013b). Afin de ne plus observer de pauvreté dans la population de producteurs de cacao dominicains, il faudrait atteindre une rétribution par personne à charge du producteur de 1115 US\$.an⁻¹, qui représente le seuil de pauvreté en République Dominicaine (ONE, 2016b). Selon les données de Notaro et al. (2019), pour qu'au moins trois quart des producteurs dégagent ce niveau de rétribution pour chaque membre de sa famille, il faudrait qu'il obtienne une valeur de production globale (GI, cf. Chapitre II) de 5943 US\$.ha⁻¹ (cf. méthode de calcul en Annexe 1). Cela correspond à presque tripler le revenu observé actuellement en moyenne chez les producteurs (Notaro *et al.*, 2019). Le fait de fixer un objectif de rentabilité économique à la démarche de conception participative de prototypes de SAF augmente la motivation et donc le souhait de s'impliquer dans le processus de la part des participants, et plus particulièrement des producteurs.

En outre, toujours en amont des ateliers, nous nous sommes engagés avec les participants à ce que cette amélioration de la performance économique ne se fasse pas au détriment de la durabilité écologique des systèmes de culture co-conçus. Par conséquent, un critère de maintien de la diversité végétale existante dans les SAF dominicains a été fixé à un minimum de 4 espèces associées aux cacaoyers dans les prototypes co-conçus, ce qui correspond à la moyenne observée dans les SAF existants par Notaro *et al.* (2019).

Dans l'évaluation *ex ante* des prototypes, nous nous sommes intéressés uniquement à leurs performances agro-économiques afin d'estimer dans quelle mesure l'objectif serait atteint. La provision en services environnementaux sera considérée comme suffisante étant donné le cadre d'objectifs et de contraintes fixé (Lançon *et al.*, 2007), c'est-à-dire dans le respect des normes de l'agriculture biologique et dans des systèmes plurispécifiques (Cerdeira *et al.*, 2017). Ces conditions sont supposées protéger les ressources en eau, recycler les nutriments du sol, et stocker du carbone pour contribuer à atténuer le changement climatique par exemple.

Le processus a été rendu entièrement participatif, sans favoriser aucun des corps de métier représentés dans ces ateliers, ni orienter les décisions prises par les participants.

III.2.5. Les leviers agroécologiques au cœur de la co-conception

Augmenter la rémunération tirée des SAF en maintenant un niveau au moins identique de biodiversité végétale équivaut à renforcer le caractère agroécologique de la cacaoculture en agroforesterie. Cela revient à rechercher la combinaison optimale d'espèces végétales cultivées pour obtenir de bons niveaux de rendements globaux sur le long terme. Les composantes (i) espèces voire variétés à implanter dans les SAF, (ii) densités de plantation de chacune ainsi que (iii) l'arrangement spatial des espèces les unes par rapport aux autres sont donc les leviers privilégiés pour la conception participative de prototypes de SAF. Les critères pour choisir les espèces ont été amenés par les participants ou présentés par des experts lorsqu'un apport de connaissances était nécessaire. Cela a été le cas par exemple pour la tolérance de certaines variétés de cacaoyers à des maladies encore absentes de l'île comme *Moniliophthora roreri* et *Crinipellis perniciosa* (mais présentes depuis 2015 sur l'île voisine de la Jamaïque).

L'émergence de ces critères de sélection a été facilitée au travers d'un atelier de dessin suivi d'une sortie en parcelle. Dans un premier temps, le dessin a permis aux participants de s'exprimer sur les éléments des SAF actuels tels qu'ils les perçoivent suivant trois niveaux d'importance à partir d'un code couleur : en « vert » les éléments essentiels, en « bleu » les éléments d'une importance moindre, en

« noir » les éléments sans intérêt voire problématiques. Puis, la sortie en parcelle a permis une meilleure explicitation de ces critères pouvant être décrits majoritairement comme des fonctions souhaitées de certains composants des SAF pour atteindre les objectifs fixés.

III.2.6. Une méthode participative de sélection des variétés de cacaoyers et des espèces associées

Pour permettre à l'ensemble des participants de s'exprimer, la méthode participative de distribution des cailloux (Sheil *et al.*, 2004) a été utilisée pour faciliter les choix techniques de sélection de variétés de cacaoyers et d'autres espèces à introduire dans les prototypes. Cette méthode très simple d'utilisation permet d'établir une classification de certains « concepts » ou « objets » les uns par rapport aux autres suivant leur ordre d'importance. Elle consiste en la répartition équitable d'un nombre donné de cailloux par chaque participant. Chaque participant les dispose ensuite sur des représentations de ces concepts ou objets suivant l'intérêt qu'ils suscitent chez lui. Par exemple un objet n'ayant aucune importance aux yeux d'un participant ne recevra de sa part aucun caillou, alors qu'un objet important pourra se voir attribuer plusieurs cailloux. On peut faire l'analogie entre un caillou et un point. La hiérarchisation par ordre d'importance des concepts ou objets se fait suivant l'ordre décroissant du nombre de cailloux (=points) affecté à chacun d'entre eux. En d'autres termes, le concept ayant reçu au total le plus de cailloux sera le 1^{er} critère de choix, et celui en ayant reçu le moins le dernier critère de choix.

Dans notre cas, la méthode de Sheil a été utilisée à trois reprises, en fournissant 10 cailloux à chaque participant, toujours dans le but de classer (1) les critères de choix pour les variétés de cacao, (2) les critères de choix pour les espèces associées, (3) les espèces végétales potentiellement intéressantes pour répondre aux critères les plus recherchés.

Pour sélectionner les variétés de cacaoyers à planter dans les prototypes, les discussions se sont basées essentiellement sur des critères de performances agronomiques dont les analyses pour chaque variété ont été réalisées dans des instituts techniques ou de recherche, locaux ou internationaux (Turnbull and Hadley, 2017). Ces données agronomiques proviennent de résultats scientifiques publiés.

Pour choisir les autres espèces végétales, ce sont uniquement des critères « évalués » par les participants qui ont été utilisés, comme ceux décrits dans le Tableau 9 de la partie « Résultats ». De plus, la liste des espèces végétales pouvant être associées aux cacaoyers a été proposée par les participants. Pour classer ces espèces associées aux cacaoyers, il a fallu procéder en 2 étapes combinées suivant la formule :

$$Score\ esp\grave{e}ce\ E = \sum_{i=1}^n (P_i * P_{i*E})$$

Où

i = critère discuté

P_i = Poids d'importance du critère i (nombre de cailloux reçus lors de la 2^{ème} utilisation de la méthode de Sheil)

P_{i*E} = Poids d'importance attribué à l'espèce E pour contribuer à la réalisation du critère (nombre de cailloux reçus lors de la 3^{ème} utilisation de la méthode de Sheil)

La classification des variétés de cacaoyers et des espèces végétales associées s'est opérée en deux ateliers distincts car les critères de sélection des cacaoyers ont été étudiés scientifiquement en stations expérimentales, tandis que les critères de sélection des espèces associées ont été évalués par les participants eux-mêmes. Nous disposons donc de données quantitatives étudiées pour les variétés de cacaoyers alors qu'il s'agit de données empiriques basées sur l'expérience des agriculteurs pour les espèces végétales associées. Les variétés de cacaoyers et les espèces de plantes associées arrivées

dans les premières positions de la classification ont été ensuite sélectionnées pour être intégrées dans les prototypes. Les variétés de cacaoyers sélectionnées ont été choisies afin de satisfaire *a minima* les trois premiers critères de sélection. Le nombre de variétés associées a été arrêté une fois que l'ensemble des participants était satisfait des variétés sélectionnées. Pour les espèces associées, le nombre minimum d'espèces sélectionnées a été fixé à quatre comme expliqué précédemment. Le nombre final d'espèces par prototype s'est établi quand les participants ne souhaitaient plus augmenter la diversité des plantes associées.

III.2.7. Choix des densités de plantation et de la disposition des espèces dans l'espace

A partir d'un jeu de schématisation des SAF, de type « serious game » (d'Aquino *et al.*, 2003; Speelman *et al.*, 2014), la question de la disposition spatiale des cacaoyers et des espèces associées les plus plébiscités par rapport aux critères de sélection a pu être abordée. Ce jeu est constitué d'un plateau rectangulaire de 0.8 m² (80 cm x 100 cm) et de nombreux jetons circulaires de 5 cm de diamètre, chacun prenant une couleur parmi 10 différentes (Figure 23). Le plateau rectangulaire représente la surface dédiée au SAF et les jetons circulaires représentent les plantes, chaque couleur étant associée à une seule espèce.



Figure 23. Atelier de schématisation des prototypes de SAF cacaoyers, permettant de fixer les espèces végétales retenues ainsi que leur disposition dans l'espace. Photo prise dans les locaux de FUNDOPO, association de producteurs partenaire, à Loma verde (province de San Cristobal) le 20/09/17 (par M. Notaro)

Pour introduire le jeu et faire comprendre aux participants le but de l'atelier, nous sommes partis d'une représentation schématique des SAF existants (Notaro *et al.* 2019) caractérisés par une disposition aléatoire des cacaoyers et des arbres d'ombrage. Les SAF étaient parfois caractérisés par des agrégations et d'autres fois par des espaces plus ouverts avec des cultures à cycle court ou tout simplement en jachère (cf. Chapitre IV). Une fois cette représentation validée par les participants, la réflexion s'est portée sur les avantages et inconvénients de la disposition spatiale des espèces dans les SAF existants qu'il était important d'explicitier pour passer à l'étape suivante de conception.

Dans un deuxième temps, il a été demandé aux participants de schématiser la disposition « optimale » selon eux des cacaoyers et des espèces ayant recueilli les scores d'espèce les plus élevés. Chaque participant est invité à schématiser l'arrangement spatial des différentes espèces en explicitant ses choix et les distances minimales ou maximales à respecter entre deux plantes d'une même espèce ou deux plantes appartenant à des espèces différentes. Après le passage de chaque participant sur cet exercice de réflexion, des grandes lignes communes à la majorité du groupe se dessinent et posent les bases de l'arrangement spatial pour le prototype. Une fois les règles de l'agencement spatial inter et intra-espèces convenues, le choix définitif des variétés et des espèces sélectionnées a pu se faire. Le jeu de plateau permet en effet de trancher sur la quantité et la qualité (i.e. espèces) à sauvegarder pour le prototype.

III.2.8. La trajectoire économique des prototypes co-conçus

Simuler la trajectoire économique des prototypes est primordial car cela permet d'évaluer leur niveau de réussite à long terme par rapport à l'objectif initial fixé, qui est de pouvoir générer un revenu (produit brut – charges) au moins égal à 5943 US\$.ha⁻¹.an⁻¹. Nous avons simulé cette trajectoire pour une période de 20 ans, durée que nous considérons suffisante pour l'expression optimale des performances agro-économiques des espèces qui sont présentes dans les prototypes. Pour y parvenir, il a fallu estimer (i) la valeur économique de la vente et de l'autoconsommation des produits issus des prototypes ainsi que (ii) les coûts liés à leur gestion. La valeur économique globale (aussi appelée Global Income GI) a été calculée à partir du rendement et du prix de vente des productions de chaque espèce présente dans les prototypes suivant trois modalités : minimum, moyen et maximum.

Pour évaluer le chiffre d'affaire généré par la vente du cacao (CI), nous avons utilisé (i) les rendements de chaque variété de cacaoyer inclus dans les prototypes, fournis par les stations expérimentales (Turnbull and Hadley, 2017) et (ii) les prix de vente pratiqués en exploitation sur les 10 dernières années fournis par le ministère de l'agriculture (Ministerio de Agricultura, 2017). Pour évaluer la valeur économique des produits associés (*economic value of other products* VOP), nous avons utilisé (i) les rendements de chaque espèce associée dans les prototypes, fournis par les participants eux-mêmes ou bien dans la littérature existante, et (ii) les prix de vente en exploitation fournis par le ministère de l'agriculture (Ministerio de Agricultura, 2017). Pour la productivité des cacaoyers par prototype, les rendements minimum, moyen et maximum correspondent respectivement à 25%, 50% et 100% du rendement observé en station expérimentale. Pour la productivité des espèces associées, les rendements minimum, moyen et maximum sont issus de consensus trouvés par les participants de chaque groupe. L'évaluation des coûts de main d'œuvre, d'achats d'outils et de matériel végétal ont été estimés conjointement par l'ensemble des participants prenant part au processus de co-conception. Cela a nécessité l'établissement d'un itinéraire technique proposé par les participants et partagé par la majorité d'entre eux, comprenant les différentes pratiques à effectuer (préparation du sol, mise en place du dispositif de plantation, plantation, taille, désherbage, récolte, etc.) et les temps et coûts de travail associés.

Ce travail rend compte année après année de l'effort à réaliser et des performances économiques estimées d'après cette méthode. Cela permet par ailleurs de réajuster certaines densités de plantation en vue de réduire le temps de travail et potentiellement d'améliorer le revenu généré via l'exploitation des prototypes.

III.2.9. Présentation et échange entre groupes de co-conception

Dans chaque province, le dernier atelier a réuni les deux groupes afin que chacun puisse présenter son prototype et les décisions sous-jacentes à leur élaboration. Ce partage d'informations a soulevé des interrogations de la part de certains participants à l'origine de débats pouvant conduire à de légères modifications finales. Le but principal de ce dernier atelier est de faire interagir des acteurs aux fonctions différentes pour que tous élargissent leur vision sur la gamme de pratiques possibles en cacaoculture.

III.3. RESULTATS

III.3.1. Les états souhaités des SAF (structure) et les fonctions agroécologiques correspondantes

Tableau 9. Résumé des états souhaités des différentes composantes des SAF suivant différentes strates et des fonctions associées pour la zone de Duarte. La police normale correspond à l'opinion du groupe de techniciens, en italique à l'opinion du groupe de producteurs et en caractère gras à l'opinion commune aux deux groupes. Les états souhaités et fonctions associées par les groupes de la zone de San Cristobal étant très similaires, ils ne sont pas présentés ici.

Strate	Composante	Etats souhaités	Fonctions
Supérieure	Arbres d'ombrage	<p>Caractérisés par un port vertical (croissance orthotrope) avec un tronc deux fois plus grand que la hauteur des cacaoyers + Ombre adéquat pour les cacaoyers <50%</p> <p><i>Ombre régulier sur les cacaoyers de la strate inférieure</i></p> <p>Capables de fixer l'azote dans le sol (Légumineuses) et de perdre annuellement des feuilles (Caducifoliées) préférentiellement en hiver</p> <p>Dont les racines s'enfoncent plus profondément que les racines des cacaoyers</p> <p>Productifs</p> <p><i>Résistants aux ouragans</i></p>	<p>Favoriser l'aération de la parcelle tout en faisant brise-vent et permettre le passage d'un rayonnement lumineux suffisant pour le développement des cacaoyers</p> <p><i>Fournir de la fraîcheur aux cacaoyers</i></p> <p>Fertiliser le sol pour améliorer le développement des plantes et favoriser l'apparition de fleurs sur les coussinets floraux</p> <p>Diminuer la compétition avec les cacaoyers pour les éléments nutritifs du sol (dont l'eau)</p> <p>Récolter une quantité importante de produits commercialisables et/ou autoconsommables</p> <p><i>Limiter les dégâts sur les cacaoyers</i></p>
Intermédiaire	Cacaoyers	<p>Caractérisés par un tronc large, produisant 3 à 5 branches principales en forme de coupe, dont la hauteur totale serait de 4 m</p> <p>Distance adéquate entre les cacaoyers (min 3 x 3 m</p>	<p>Faciliter la floraison et la production de cabosses ainsi que leur récolte</p>

		Bonne qualité organoleptique des fèves de cacao (couleur blanche souhaitée, variétés de type Criollo ou Trinitario)	<p>Ne pas encombrer l'espace pour limiter la compétition entre les cacaoyers (racines et branches) + limiter le passage des rayons lumineux jusqu'au sol</p> <p>Obtenir des marchés de niche avec des prix de vente plus intéressants</p>
	Ravageurs (rats et pics)	Peu présents à disparition complète	Maintenir un rendement le plus élevé possible
	Maladies (<i>Phytophthora spp.</i> , <i>Fusarium decemcellulare</i>)	Peu présentes à disparition complète	Maintenir un rendement le plus élevé possible
Inférieure	Ombrage	Fort sous les cacaoyers	Eviter le développement des mauvaises herbes
	Plantes cultivées	A port bas et productives <i>En barrière perpendiculaire à la pente</i>	<p>Eviter la compétition avec les cacaoyers pour l'accès aux ressources du sol et de lumière et provision de produits de vente ou d'autoconsommation</p> <p><i>Limiter l'érosion</i></p>
	Mauvaises herbes	Dans les parcelles à pente forte, laisser certaines espèces de mauvaises herbes couvrir le sol (i.e. <i>Mimosa pudica</i> , <i>Arachis pintoï</i> , <i>Commelina nudiflora</i>)	Limiter l'érosion et maintenir une bonne humidité du sol
	Sol	<p>Les 5 premiers centimètres riches en matière organique en décomposition (<i>sol noir</i>) et un sol vivant hébergeant de nombreux lombrics et autres vers de terre. Un sol équilibré entre sable, limon et argile qui s'effrite facilement</p> <p>Présence d'une couverture végétale aux abords des rivières et des ravines présentes dans les parcelles</p>	<p>Maintenir ou améliorer le niveau de fertilité du sol pour assurer des bons niveaux de rendements</p> <p>Protéger la ressource en eau d'éventuelle dégradation</p>
Toutes strates	Pollinisateurs (mouches blanches, abeilles, fourmis)	Présents dans les parcelles (hébergés par les <i>Musaceae</i> et <i>Ananas comosus</i> ou bien les attirer en laissant pourrir certains fruits comme ceux des agrumes)	Polliniser les fleurs et augmenter les rendements

Les objets de la parcelle sur lesquels le regard est porté dans les deux régions par les deux groupes sont identiques. Ils correspondent aux composantes décrites dans le Tableau 9. Les états souhaités ainsi que les fonctions associées sont en outre décrits avec un lexique très similaire et dans une vision d'ensemble sensiblement proche. Qu'il s'agisse des producteurs ou des techniciens, tous s'attardent à décrire l'importance des plantes associées à la fois dans le maintien de bons niveaux de services écosystémiques (entretien de la fertilité du sol, pollinisation, régulation de la pression fongique ou de ravageurs) afin de soutenir un développement optimal des cacaoyers tout en étant elles-mêmes capables de fournir des produits commercialisables ou autoconsommables (Tableau 9).

Le groupe des techniciens a certainement une connaissance de la physiologie des plantes plus solide, c'est pourquoi on observe parfois des fonctions attendues un peu plus détaillées (e.g. « favoriser un rayonnement lumineux suffisant pour les coussinets floraux des cacaoyers en leur donnant une forme de coupe via la taille et en associant des arbres associés perdant leurs feuilles en période de floraison des cacaoyers »). Aussi, toujours pour ce groupe, la qualité organoleptique des fèves de cacao apparaît importante dans le but d'assurer les accords commerciaux entre les coopératives et les chocolatiers, et peut-être même envisager des marchés de niche plus rentables. Ces fonctions souhaitées ont ensuite été résumées et reformulées en critères de sélection (Tableau 10) qui ont été utilisés par la suite pour choisir les variétés de cacaoyers et les espèces de plantes associées. Certains critères n'ont pas été utilisés pour le choix des variétés de cacaoyer, comme la qualité organoleptique du cacao, car il n'existe pas d'indicateur permettant de l'évaluer individuellement pour chaque variété. Nous avons choisi d'intégrer la tolérance des variétés contre des champignons encore absents de l'île d'Hispaniola mais géographiquement proches et donc susceptibles d'arriver sur l'île prochainement. Il s'agit de (i) *Moniliophthora roreri* présente sur le continent sud-américain depuis plus d'un siècle et en Jamaïque depuis 2016 (Johnson *et al.*, 2017; Bailey *et al.*, 2018) et (ii) *Crinipellis pernicioso* présente sur le continent sud-américain (Evans, 2016), respectivement responsables des maladies de la moniliose et du balai de sorcière. La tolérance à d'autres maladies déjà présentes sur l'île telles que la pourriture brune causée par *Phytophthora palmivora* et la buba causée par *Fusarium decemcellulare* a aussi été prise en compte pour la sélection des variétés de cacaoyers (Tableau 10). Un tableau récapitulatif de ces caractéristiques agronomiques pour les 110 variétés présentes en République Dominicaine est présenté en Annexe 2.

Tableau 10. Critères utilisés pour la sélection des variétés de cacaoyers et des espèces végétales associées.

Cible	Critères de sélection
Variétés de cacaoyers	<ul style="list-style-type: none"> - Autocompatibilité du pollen - Productivité - Tolérance et sensibilité à <i>Phytophthora palmivora</i> et <i>Fusarium decemcellulare</i> - Tolérance et sensibilité à <i>Moniliophthora roreri</i> et <i>Crinipellis pernicioso</i>
Espèces végétales associées aux cacaoyers	<ul style="list-style-type: none"> - Facilité de gestion en parcelle - Commodité de commercialisation - Attractivité du prix de vente des produits - Productivité - Période de production (différente des cacaoyers) - Rapidité de production - Caractères favorables au développement des cacaoyers (ombrage adéquat, racines non compétitives avec celles des cacaoyers, amélioration de la fertilité du sol, etc.) - Résistance aux passages d'ouragans

III.3.2. La composante cacaoyer (variétés choisies)

Tableau 11. Résultats de la méthode de Sheil (nombre de points rapporté à un total de 50 par groupe) appliquée aux critères de sélection des variétés de cacaoyers pour les deux groupes des deux zones (PSC : groupe de producteurs de la province de San Cristobal, TSC : groupe de techniciens de la province de San Cristobal, PD : groupe de producteurs de la province de Duarte, TD : groupe de techniciens de la province de Duarte).

Critère	PSC	TSC	PD	TD
Productivité	21	23	14	17
Autocompatibilité	6	6	17	14
Tolérance à la pourriture brune	12	6	17	6
Tolérance à la moniliose	1	13	0	11
Tolérance au balai de sorcière	1	1	0	2
Tolérance à la galle	9	1	2	0

Les critères de sélection des variétés de cacaoyers diffèrent suivant les groupes et les zones (Tableau 11) et se distinguent de la façon suivante :

- les deux groupes de San Cristobal privilégient la productivité, alors que les deux groupes de Duarte accordent une importance comparable à la productivité et à l'autocompatibilité.
- les deux groupes de producteurs sont plus sensibles à la pourriture brune, alors que les deux groupes de techniciens sont plus sensibles à la moniliose. L'appréhension de l'arrivée sur l'île de la moniliose et des pertes de rendement qu'elle engendrerait amène les techniciens à porter le critère de sélection de variétés de cacaoyers tolérantes à cette maladie devant la pourriture brune.

A partir de ces résultats, les clones ont été sélectionnés collectivement, via l'approbation de la majorité du groupe. Les groupes PSC et TSC ont choisi quatre clones tandis qu'il y en avait dix et sept pour les groupes PD et TD respectivement. Les greffons de chaque clone ont été greffés sur des porte-greffes issus de germination de fèves provenant des clones IMC-67, UF-613, POUND-7 et POUND-12 ayant des propriétés de vigueur et de développement racinaire intéressantes pour assurer la réussite du greffage et le développement du greffon (Communication personnelle de la Commission Nationale du cacao).

III.3.3. La composante plantes associées (espèces et variétés choisies)

Tableau 12. Résultats de la méthode de Sheil (nombre de points rapporté à un total de 50 par groupe) appliquée au poids d'importance P_i donné à chaque critère de sélection des espèces associées aux cacaoyers chez les deux groupes des deux zones (PSC : groupe de producteurs de la province de San Cristobal, TSC : groupe de techniciens de la province de San Cristobal, PD : groupe de producteurs de la province de Duarte, TD : groupe de techniciens de la province de Duarte).

Critères	PSC	TSC	PD	TD
Favorable aux cacaoyers	4	12	11	22
Productivité	4	9	12	8
Prix de vente	7	6	5	2
Facilité de commercialisation	13	9	10	8
Période de production	3	7	3	0
Facilité de gestion technique	10	5	4	4
Rapidité de production	6	1	3	4
Résistance aux ouragans	3	1	2	2

Pour les deux groupes de techniciens, le 1^{er} critère de choix des espèces associées aux cacaoyers est qu'elles soient favorables au développement et à la production des cacaoyers, particulièrement pour TD. La productivité de ces espèces et la présence de marché pour leurs produits sont les critères de seconde importance.

Pour les deux groupes de producteurs, les divergences sont plus importantes. Pour le groupe PD, que les espèces associées soient bénéfiques pour les cacaoyers est aussi un critère de sélection important, mais juste derrière celui de la productivité et juste devant la simplicité d'accès au marché (Tableau 12). C'est justement ce dernier critère qui est le plus important pour le groupe PSC devant celui de facilité de gestion technique des espèces associées.

Les critères de résistance aux ouragans, de rapidité de production une fois planté en parcelle et de période de production décalée par rapport aux cacaoyers n'ont que peu d'importance pour les 4 groupes de co-conception.

Les Musacées sont les espèces ayant obtenu le meilleur score pour chaque groupe (Annexe 3), répondant de fait aux principaux critères présentés dans le Tableau 12. Musacées, avocatiers et agrumes sont des plantes que l'on retrouve dans chaque prototype car elles sont essentielles à la culture alimentaire dominicaine. Leurs fruits pourront à la fois servir à l'alimentation de la famille du producteur ou bien être vendus à des intermédiaires connectés aux marchés nationaux. Les autres espèces arrivant en tête de ce classement sont régulièrement associées aux cacaoyers comme les plantes de services (le gliricide, l'érythrine, le roucou) ou celles fournissant des aliments de base (taro, igname, pois d'angole) ou des fruits (sapotillier, corossolier, cocotier). Les deux espèces qui sont rarement associées aux cacaoyers sont le catalpa et le citronnier vert.

III.3.4. La structure des SAF

Les discussions de la structure des prototypes de SAF sont un moment clé du processus qui permet de débattre de la combinaison entre la composante « cacaoyers » et la composante « plantes associées », et donc de l'arrangement spatial entre les espèces végétales sélectionnées. Aussi, cet atelier permet de revenir sur les espèces qui seront associées aux cacaoyers en ne sélectionnant pas uniquement les plantes ayant le plus haut score d'espèce E dans l'étape 3. En effet, chaque espèce peut obtenir un score d'espèce E élevé, mais associée à d'autres espèces elle perd de son intérêt, pour des raisons explicitées par les participants lors de l'atelier. Par ailleurs, tous les groupes insistent sur le besoin de cultures à cycle court à l'installation des prototypes afin d'assurer un revenu, mais aussi pour favoriser le développement des cacaoyers et empêcher la croissance de mauvaises herbes.

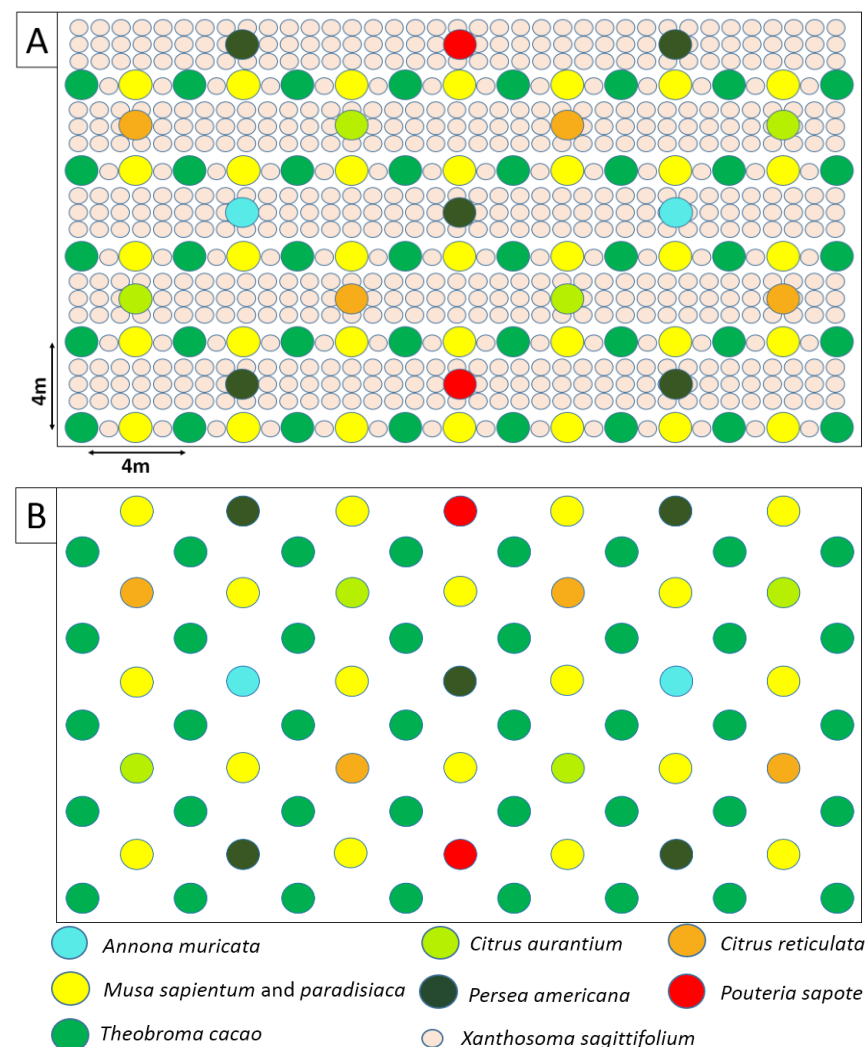
Tous les groupes souhaitent modifier l'agencement des cacaoyers par rapport à celui actuellement observé dans les SAF où ils sont disposés aléatoirement dans l'espace, pour une disposition plus régulière en ligne (cf. Figures 24, 25, 26 et 27 respectivement pour les prototypes PSC TSC, PD et TD). Les raisons invoquées sont (i) de fournir un espace identique à chaque cacaoyer pour son développement et éviter les compétitions pour les ressources et (ii) faciliter la gestion technique des cacaoyers ainsi que leur récolte par l'aménagement d'allées (inter-rang). Suivant les groupes, les résultats finaux sont relativement contrastés en ce qui concerne la densité en cacaoyers : le groupe PSC propose une densité de 640 cacaoyers par hectare alors que le groupe PD en propose 1120 par hectare, ce qui constitue le minimum et le maximum des quatre prototypes ; les deux autres groupes se situant à 896 et 960 cacaoyers.ha⁻¹ pour TSC et TD respectivement.

Pour les plantes associées, on n'observe pas d'écart si important au niveau des densités d'arbres. Les densités proposées sont de 192 arbres/ha pour le groupe PD et de 288 arbres/ha pour le groupe TD, les autres groupes se situant à des densités intermédiaires. Aucun groupe n'a souhaité mélanger sur un même rang les cacaoyers avec d'autres espèces d'arbres. Ces derniers se retrouvent par conséquent dans l'inter-rang. En phase jeune du prototype dite « de développement », de l'installation jusqu'à huit ou dix ans suivant les prototypes, on observe des densités parfois importantes de tubercules (taro, gingembre, curcuma), de musacées (banane dessert ou plantain) ou d'arbres de service (Gliricide et Roucou). Dans leur état final dite phase « mature », les prototypes auront une richesse spécifique de plantes associées aux cacaoyers comprise entre quatre (groupe PD), six (groupe PSC) et sept espèces (groupes TSC et TD). On retrouve l'avocatier (*Persea americana*) et les agrumes (du genre *Citrus*) dans les quatre prototypes. Les prototypes PSC et PD sont dominés par les fruitiers (Tableaux 13 et 15), le prototype PSC se distinguant par la présence de Corossoliers et de Sapotilliers (*Annona muricata* et *Pouteria sapote*) et le prototype PD par la présence de cocotiers (*Cocos nucifera*). Le prototype TSC (Tableau 14) se démarque par la présence de trois espèces forestières (*Catalpa longissima*, *Gmelina arborea* et *Swietenia mahagoni*) tandis que le prototype TD (Tableau 16) se différencie par une association importante de Gliricides (*Gliricidia sepium*), disposées en rangées parallèles aux cacaoyers et servant de tuteur au poivrier (*Piper nigrum*).

Prototype PSC

Tableau 13. Récapitulatif des espèces végétales sélectionnées et de leur densité de plantation initiale (de 0 à 7 ans) et finale (prototype d'au moins 7 ans) pour le prototype du groupe PSC sur 1/16^{ème} d'ha.

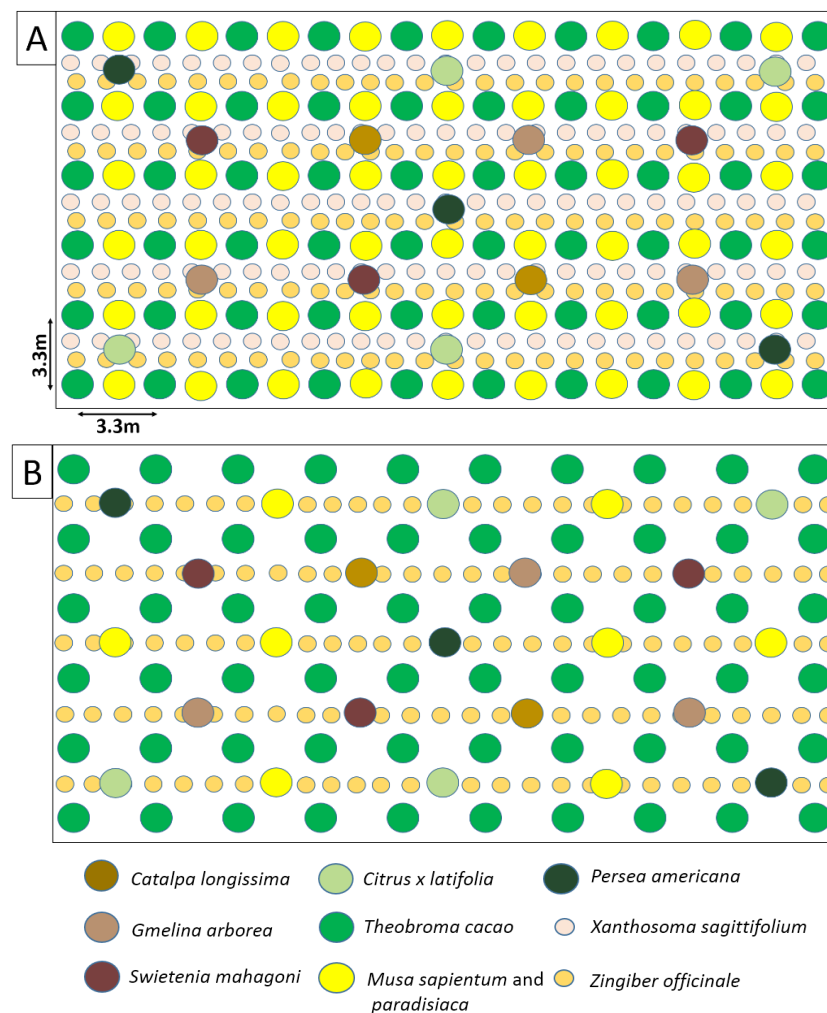
Nom commun	Nom scientifique	Densité initiale	Densité finale	Variétés
Cacaoyer	<i>Theobroma cacao</i>	40	40	Clones ICS-39, UF-221, ML-4, ML-103 en quantités égales
Banancier (dessert et/ou plantain)	<i>Musa spp.</i>	40	0 à 19	Banane dessert "Pluma fina y media mata" et plantain "macho por hembra"
Taro	<i>Colocasia esculenta</i>	Jusqu'à 400	0	Blanc ou jaune
Oranger (Bagchi et al.)	<i>Citrus aurantium</i>	4	4	Oranger amer local
Mandarine	<i>Citrus reticulata</i>	4	4	La moitié locale et l'autre moitié greffée sur des porte-greffe d'oranger amer
Sapotillier	<i>Pouteria sapote</i>	2	2	Greffon de sapotillier productif sur porte-greffe de sapotillier local
Corossolier	<i>Annona muricata</i>	2	2	Corossolier local qui sera greffé une fois une hauteur de 2 m atteinte avec des greffons de Corossoliers élités de Puerto Planta
Avocatier	<i>Persea americana</i>	5	5	Avocatier local, greffé avec des greffons de variétés Benny et Pola une fois une hauteur de 3m atteinte en parcelle



Prototype TSC

Tableau 14. Récapitulatif des espèces végétales sélectionnées et de leur densité de plantation initiale (de 0 à 7 ans) et finale (prototype d'au moins 7 ans) pour le prototype TSC sur 1/16^{ème} d'ha.

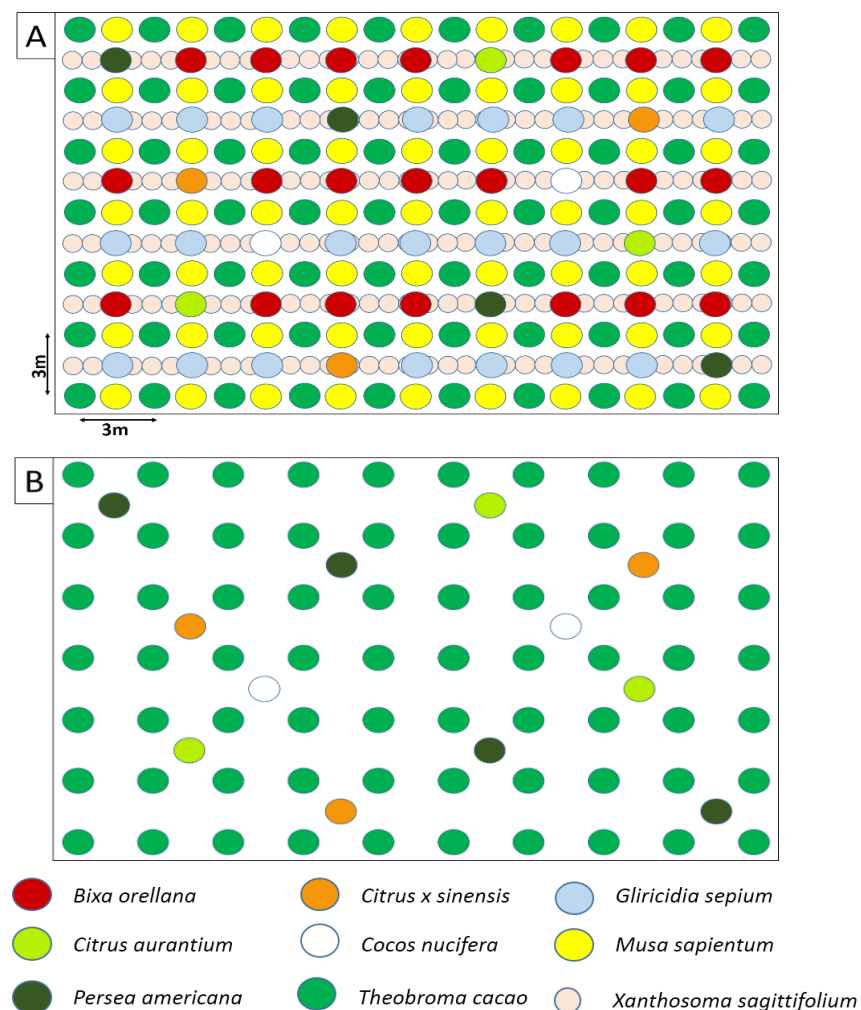
Nom commun	Nom scientifique	Densité initiale	Densité finale	Variétés
Cacaoyer	<i>Theobroma cacao</i>	56	56	Clones ICS-95, UF-676, GS-36, ML-22 en quantités égales
Bananier (dessert et/ou plantain)	<i>Musa spp.</i>	40	0 à 8	Banane dessert "Pluma fina y media mata" et plantain "macho por hembra" suivant les conditions pédoclimatiques
Taro et/ou Gingembre	<i>Colocasia esculenta</i> y/o <i>Zingiber officinale</i>	Jusqu'à 400	Jusqu'à 200	Taro blanc ou jaune suivant le type de sol; Gingembre créole pour la qualité ou gingembre américain pour la productivité
Citronnier (vert)	<i>Citrus latifolia</i>	4	4	Variété locale
Avocatier	<i>Persea americana</i>	3	3	Avocatier local, greffé avec des greffons de variétés Benny et Pola une fois une hauteur de 3m atteinte en parcelle
Gmelina	<i>Gmelina arborea</i>	3	3	Variété locale
Acajou	<i>Swietenia mahagoni</i>	3	3	Acajou d'Afrique
Catalpa	<i>Catalpa longissima</i>	2	2	Variété locale



Prototype PD

Tableau 15. Récapitulatif des espèces végétales sélectionnées et de leur densité de plantation initiale (de 0 à 7 ans) et finale (prototype d'au moins 7 ans) pour le prototype PD sur 1/16ème d'ha.

Nom commun	Nom scientifique	Densité initiale	Densité finale	Variétés
Cacaoyer	<i>Theobroma cacao</i>	70	70	Clones ICS-1, ICS-39, RZ-12, RZ-44, RZ-83, RZ-100, IML-44, IML-53, ML-66, ML-103 en quantités égales
Bananier (dessert)	<i>Musa sapientum</i>	70	0 à 5	Variété locale
Gliricide	<i>Gliricidia sepium</i>	21	0	Variété locale
Roucou	<i>Bixa orellana</i>	21	0	Variété locale
Taro	<i>Colocasia esculenta</i>	264	0 à 5	Taro blanc
Oranger (doux)	<i>Citrus sinensis</i>	3	3	Variété locale
Oranger (Bagchi et al.)	<i>Citrus aurantium</i>	3	3	Variété locale
Avocatier	<i>Persea americana</i>	4	4	Variété locale
Cocotier	<i>Cocos nucifera</i>	2	2	Variété locale



Prototype TD

Tableau 16. Récapitulatif des espèces végétales sélectionnées et de leur densité de plantation initiale (de 0 à 7 ans) et finale (prototype d'au moins 7 ans) pour le prototype TD sur 1/16ème d'ha.

Nom commun	Nom scientifique	Densité initiale	Densité finale	Variétés
Cacaoyer	<i>Theobroma cacao</i>	60	60	Clones ICS-39, UF-296, ICS-95, IML-119, IML-53, ML-22, ML-105 en proportions égales
Banancier (plantain)	<i>Musa paradisiaca</i>	60	10	Variété "macho por hembra"
Taro	<i>Colocasia esculenta</i>	Jusqu'à 200	0	Blanc ou violet
Gingembre et/ou Curcuma	<i>Zingiber officinale</i> y/o <i>Curcuma longa</i>	Jusqu'à 200	0 à 100	Gingembre américain et Curcuma local
Gliricide	<i>Gliricidia sepium</i>	10	10	Variété locale
Poivrier	<i>Piper nigrum</i>	15	0	Balankotta et/ou Guayarina et/ou Singapur
Fruit de la passion	<i>Passiflora edulis</i>	0	15	Fruit de la passion jaune ovale
Avocatier	<i>Persea americana</i>	4	4	Variétés "has" et "popenol"
Oranger (doux)	<i>Citrus sinensis</i>	2	2	Variété locale
Oranger (Bagchi et al.)	<i>Citrus aurantium</i>	2	2	Variété locale

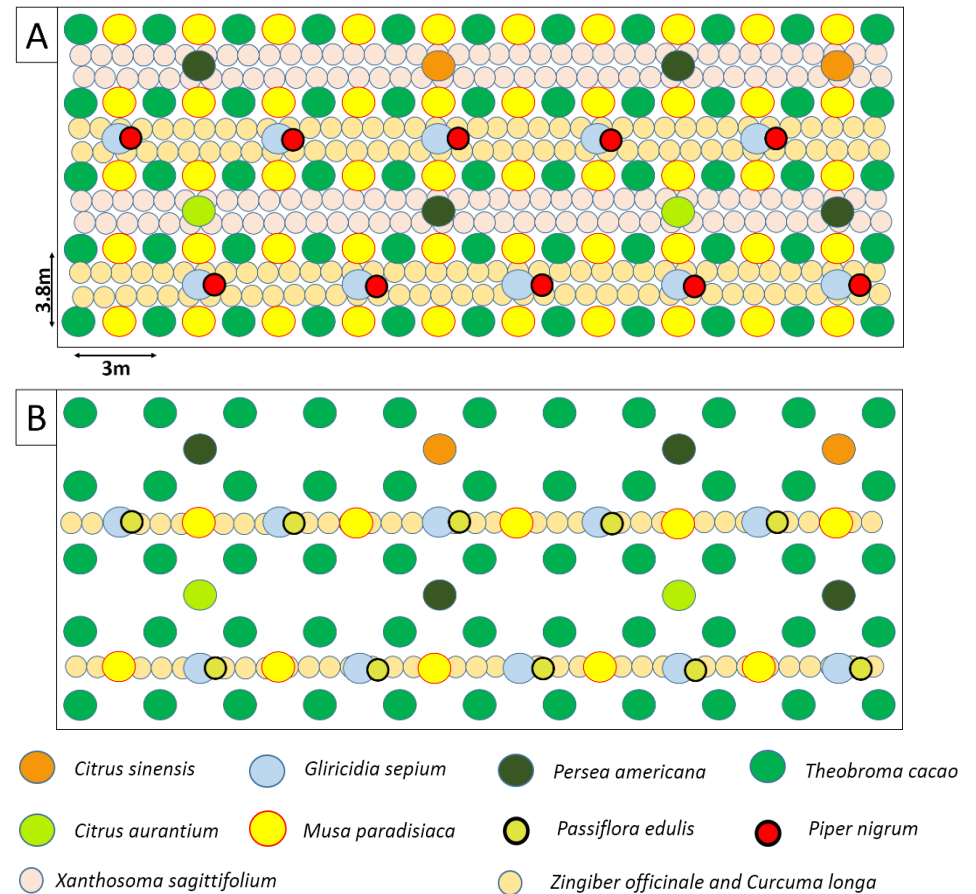


Figure 27. Représentation schématique du prototype TD sur 1/16ème d'ha. La phase A correspond à la phase jeune du prototype (les 7 premières années), tandis que la phase B représente la phase mature (> 7 ans).

Quelques pratiques originales ont été proposées pour les prototypes PSC et/ou TSC :

- les agrumes autres que *Citrus aurantium* seront greffés en pépinière sur des porte-greffes de *Citrus Aurantium* qui s'avère être l'espèce du genre *Citrus* la plus résistante à la maladie du Huanglongbing ;
- les avocatiers de variétés améliorées Benny et Pola seront greffés une fois que les plants d'avocatiers endémiques (« *Criollo* ») plantés mesureront au minimum 3 m afin d'éviter un encombrement de la strate où se trouvent les branches des cacaoyers ;
- des greffons provenant d'*Annona muricata* particulièrement productive venant de la province de Puerto Plata seront greffés sur des plantes de cette espèce pour le prototype PSC après qu'elles aient atteint une hauteur de 2 m.

Pour les prototypes PD et TD, seul *Citrus sinensis* sera greffé sur des plants de *Citrus aurantium* en pépinière avant d'être planté dans le prototype.

III.3.5. Evaluation des performances économiques des quatre prototypes co-conçus

Cette méthode d'évaluation du GI des prototypes donne des résultats très contrastés entre le GI minimum (produit du rendement minimum par le prix minimum) et le GI maximum (produit du rendement maximum par le prix maximum) (Figure 28). Au minimum, les prototypes se situeraient autour des résultats observés actuellement, c'est-à-dire 2500 US\$/ha/an, mais au maximum ils se situeraient environ à 24000 US\$/ha/an, soit une différence de près d'un facteur dix ! Le coût estimé des intrants (main d'œuvre et outils) est soit quasiment identique (TSC et TD), soit légèrement supérieur (PSC), soit légèrement inférieur (PD), au GI minimum. L'exemple de l'itinéraire technique du prototype PSC, élaboré en atelier participatif et comprenant les temps de travaux nécessaires et les coûts associés à chaque pratique est présenté en Annexe 4. La part du CI par rapport au GI varie entre les quatre prototypes du simple au triple, de 15% au minimum pour le prototype 1 à 43% au maximum pour le prototype TD.

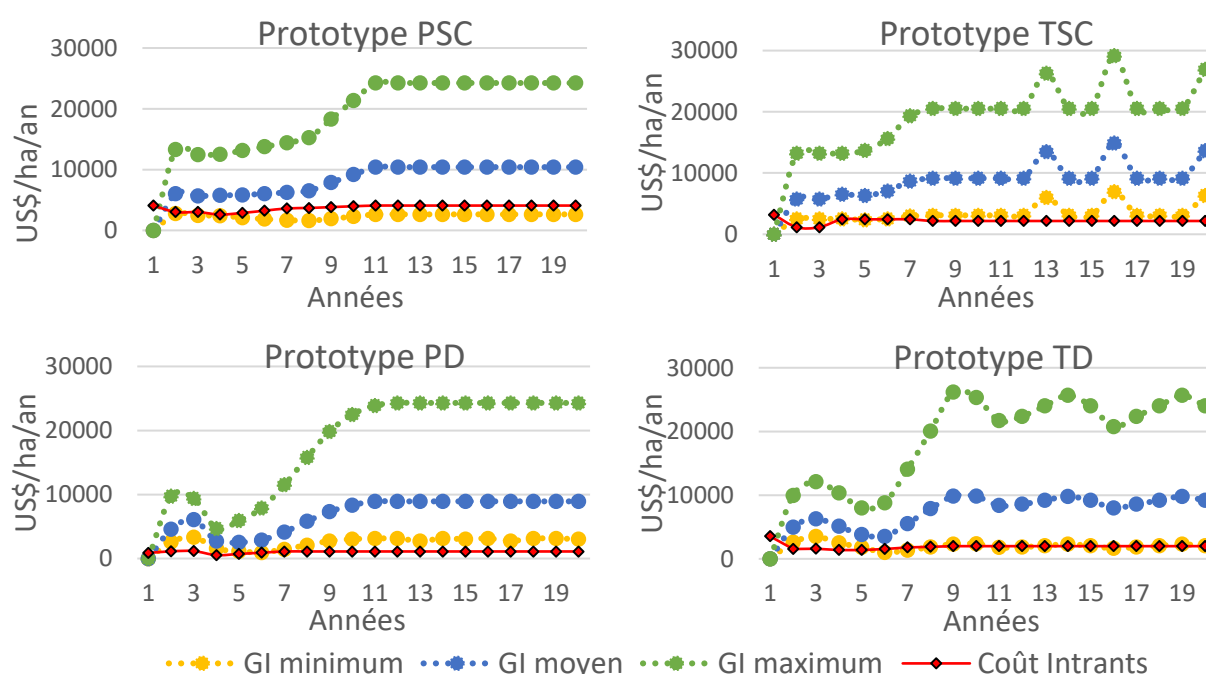


Figure 28. Projections économiques des quatre prototypes co-conçus sur 20 ans, basées (i) pour chaque culture associée sur des rendements minimum, moyen et maximum fournis par les participants ainsi que des prix d'achat sur l'exploitation minimum, moyen et maximum fournis par le ministère de l'agriculture et (ii) pour le cacao, sur des rendements fournis par des recherches menées en stations expérimentales et des prix d'achat fournis par les participants. La ligne rouge représente l'estimation des coûts en main d'œuvre et matériel (végétal + outils).

Globalement, la tendance est à l'augmentation du GI jusqu'à un seuil atteint la 11^{ème} année après installation pour les prototypes PSC et PD. La 1^{ère} année est une année blanche, et excepté pour le prototype TSC, on observe généralement une petite baisse de la performance économique entre la 3^{ème} et la 5^{ème} année. Cela s'explique par une baisse de la densité des espèces annuelles ou pluriannuelles afin de laisser progressivement de l'espace nécessaire au développement des cacaoyers et arbres associés. Pour les prototypes TSC et TD, on observe des variations importantes du GI estimé : (i) dans le cas du prototype 2, les trois pics de GI observés correspondent à la vente des arbres de bois d'œuvre de *Gmelina arborea*, *Swietenia mahagoni* et *Catalpa longissima* respectivement dans cet ordre chronologique car ils ont des vitesses de croissance décroissantes, (ii) pour le prototype TD, les ondulations visibles du GI s'expliquent par la présence de *Passiflora edulis* qui est une pluriannuelle qu'il faut replanter tous les cinq ans.

Cette étape du processus permet d'apporter des résultats par rapport à l'objectif de départ. A partir d'un certain stade de maturité des prototypes (entre huit et dix ans), on observe que si le CA moyen est atteint pour les 4 prototypes, les producteurs dégagent un GI entre 8900 US\$.ha⁻¹.an⁻¹ (prototype PD) et 10400 US\$.ha⁻¹.an⁻¹ (prototype PSC). Dans ce cas, même en faisant appel à de la main d'œuvre externe pour réaliser l'ensemble des pratiques culturales, les quatre prototypes permettraient de dégager un revenu supérieur ou égal à 5943US\$.ha⁻¹.an⁻¹.

III.4. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

III.4.1. Une méthode simple et originale de conception pour des systèmes de culture plurispécifiques complexes

La méthode de conception mise au point est originale du fait qu'elle agrège des outils utilisés indépendamment dans d'autres travaux de recherches, qui sont facilement appropriables par les participants et donnent à chacun l'opportunité de s'exprimer pour expliciter ses choix : (i) à la manière de Lamanda *et al.* (2012), nous avons conceptuellement modélisé le fonctionnement des SAF via une description de la part des participants des fonctions et/ou des processus écologiques sous-jacents dans le but d'améliorer leurs performances agroéconomiques (Etape 1) ;(ii) le choix et la hiérarchisation des critères de sélection des espèces via la méthode de dénombrement des cailloux (Sheil *et al.*, 2004) qui a l'origine était une méthode employée pour caractériser l'importance des composantes de l'environnement de communautés rurales indonésiennes, (iii) la prise de décision de l'arrangement spatial des espèces les unes par rapport aux autres (Etape 2) à l'aide d'un artefact de schématisation de SAF qui est un jeu sérieux que l'on retrouve par exemple pour la conception de systèmes de production à base d'élevage (Martin *et al.*, 2011), ou encore utilisé par la modélisation d'accompagnement « ComMod » (Bodonirina *et al.*, 2018; Redpath *et al.*, 2018). Enfin, l'évaluation *ex ante* des performances des prototypes (Etape 3) est effectuée afin de vérifier la cohésion des choix techniques avec les objectifs fixés (Sadok *et al.*, 2008), comme c'est généralement le cas avant le lancement d'un produit nouveau. Le prototypage expérimenté dans notre étude s'efforce donc d'innover de façon systémique, c'est-à-dire en prenant compte l'ensemble des composantes végétales des SAF, et pas seulement quelques services en particulier comme cela a pu être fait dans d'autres travaux de conception (e.g. Meylan *et al.* (2013).

L'originalité vient aussi du fait que la conception participative a porté sur des systèmes plurispécifiques, qui sont des systèmes extrêmement complexes de par la diversité des espèces qui les composent à la fois dans l'espace et dans le temps. Les relations entre espèces considérées dans ce travail de co-conception sont plus diverses que dans les systèmes agroforestiers de milieux tempérés (dont la diversité et l'organisation spatiale des espèces cultivées sont généralement plus simples), dans les vergers (Simon *et al.*, 2017) ou en grandes cultures (Debaeke *et al.*, 2009). Toutefois il existe des

ressemblances méthodologiques dans le travail de co-conception avec les travaux de Simon *et al.* (2017), avec dans cet ordre 1) la fixation d'objectifs agronomiques, 2) le choix des espèces et leur arrangement dans (i) l'espace et (ii) le temps, et 3) une évaluation des performances globales des prototypes conçus. Même si sur les grands principes de la biodiversité, l'agroécologie a une certaine maturité (Malézieux, 2011), elle manque encore de connaissances précises sur les processus entre espèces. Malézieux *et al.* (2009) et Clough *et al.* (2011) ont montré que des systèmes SAF très diversifiés n'empêchent pas l'obtention de bons rendements en cacao. Aussi, plus les systèmes sont diversifiés, meilleure est la résilience en cas d'événements climatiques majeurs comme le passage d'ouragans (Altieri *et al.*, 2015), ce qui est improbable en République Dominicaine. D'autres études ont montré que c'est pour un niveau de biodiversité intermédiaire que les meilleurs rendements sont observés (Brickhill, 2015). Le maintien d'une richesse spécifique comprise entre 5 et 8 espèces (en incluant le cacao) au sein des prototypes devrait donc représenter un avantage pour améliorer les conditions économiques des ménages agricoles vivant de la cacaoculture. Par ailleurs, la présence d'arbres plus grands que les cacaoyers permet de maintenir une humidité plus forte dans le premier horizon du sol où se trouvent les racines de cacaoyers par rapport à des systèmes monospécifiques de cacaoyers (Niether *et al.*, 2017), ce que les producteurs comme les techniciens avaient prévenu (cf. Tableau 9 des états souhaités et fonctions associées).

Les producteurs de cacao qui ont l'habitude de gérer des SAF ont par conséquent des connaissances expertes issues de leur expérience. Leur parcours d'agriculteur leur a permis d'observer et de tester certaines innovations, comme par exemple des combinaisons d'espèces différentes ainsi qu'une diversité de techniques de gestion de ces espèces. Ils acquièrent par leur propre expérience des connaissances et compétences pouvant être perçues comme des innovations prometteuses suivant l'objectif visé (Catalogna *et al.*, 2018; Navarrete *et al.*, 2018). Les producteurs ayant participé aux ateliers de co-conception ont chacun, à leur niveau, des connaissances à partager pouvant s'apparenter à des innovations agroécologiques utiles dans notre cas (Toffolini *et al.*, 2017). D'une certaine façon ces ateliers représentent « une traque collective » à l'innovation, quand d'autres méthodes sont plus individuelles (Salembier *et al.*, 2015).

III.4.2. Une méthode générique innovante mais en manque d'adaptabilité

On peut analyser les innovations mises en place sur deux principaux aspects : (i) la séquence temporelle des combinaisons d'espèces et de leur densité respective, et (ii) l'arrangement spatial de ces espèces. Les quatre groupes ont innové quant à la disposition spatiale des espèces végétales, curieusement en choisissant des motifs similaires : des cacaoyers en ligne et d'autres espèces pérennes dans l'inter rang réparties de façon régulière dans l'espace, alors que la disposition observée dans les SAF actuels est plutôt aléatoire, rarement agrégée. On aurait cependant pu penser que la continuité en cacaoyers au sein d'un rang soit parfois interrompue par la présence d'un arbre associé, mais aucun groupe n'a souhaité que l'arrangement spatial des espèces suive ce motif. La disposition choisie, de type régulière dans l'espace à la fois des cacaoyers et des arbres d'ombrage, n'est pas nécessairement optimale à tous les points de vue ; elle pourrait par exemple avoir des effets négatifs sur la prévalence de bioagresseurs comme cela a été démontré pour la moniliose au Costa Rica ou les mirides au Cameroun (Gidoïn *et al.*, 2014a; Gidoïn *et al.*, 2014b).

En ce qui concerne la séquence des combinaisons d'espèces, on distingue des différences plus marquées entre groupe de producteurs et groupe de techniciens. Les espèces choisies dans les prototypes de producteurs et leur chronoséquence sont proches de l'existant mais des innovations techniques ont été intégrées. On peut citer par exemple le choix de certaines variétés d'avocats, le greffage à partir de matériel végétal spécifique en pépinière ou en parcelle, entre autres. On remarque cependant une place plus forte laissée aux cacaoyers pour les prototypes de producteurs de Duarte

avec 1120 cacaoyers.ha⁻¹ contre 640 cacaoyers.ha⁻¹ à San Cristobal. Cette différence est peut-être induite par le contexte agricole des deux régions, la première étant un bassin de très forte production de cacao à l'échelle nationale. Au sein des prototypes de techniciens, les espèces sélectionnées sortent de l'ordinaire : (i) pour TSC, trois essences forestières en vue d'une exploitation du bois d'œuvre échelonnée dans le temps permettant la replantation et le maintien d'un couvert forestier continu, et (ii) pour TD, des espèces de type liane (poivre et fruit de la passion) tuteurées sur des arbres fixateurs d'azote (gliricide) en ligne dans l'inter rang de cacaoyers. On observe donc un choix d'évolution temporelle des espèces dans les prototypes produits par les techniciens. Cela les distingue des prototypes de producteurs, invariants dès la 4^{ème} année. En revanche, les quatre groupes sont innovants quant au choix des variétés de cacaoyers, contrastant avec la méthode de sélection massale qui est à ce jour la méthode de production de cacaoyers hybrides la plus largement adoptée et effectuée par les producteurs eux-mêmes.

Les prototypes co-construits tiennent compte de généralités agroécologiques, c'est-à-dire d'états souhaités remplissant certaines fonctions comme par exemple le besoin d'avoir des arbres associés dont l'ombrage fourni aux cacaoyers soit léger et homogène avec une frondaison haute et relativement étendue horizontalement. Or ces traits fonctionnels peuvent être fournis par une diversité plus ou moins importante d'espèces. Le consensus intervient pour décider parmi ces potentielles espèces lesquelles feront partie des prototypes et lesquelles seront laissées de côté alors que certains participants auraient préféré les intégrer aux prototypes. Par conséquent, l'adoption des prototypes par ces producteurs pourrait en être affaiblie. En outre, cette aversion à l'incertitude de la part des producteurs serait légitimement plus forte envers les prototypes conçus par les groupes de techniciens, même s'ils ont fait l'objet de discussions communes entre producteurs et techniciens lors du dernier atelier. Cette méthode générique basée sur le consensus tient compte des spécificités régionales propres aux deux régions mais manque, *de facto*, d'adaptabilité à l'échelle parcellaire c'est-à-dire aux contraintes spécifiques de chaque agriculteur. Une approche tournée davantage vers les besoins exprimés des producteurs et non pas sur un objectif fixé à l'avance aurait probablement apportée des innovations plus franches et potentiellement mieux adoptées (Dogliotti *et al.*, 2014; Hazard *et al.*, 2017).

III.4.3. Des performances agro-économiques à évaluer *in situ*

D'après les estimations économiques réalisées, le GI moyen serait presque deux fois supérieur au revenu permettant à 75% des producteurs et de leur famille de sortir de la pauvreté (cf. méthode de calcul en annexe). Cela reviendrait à multiplier par quatre le GI moyen généré actuellement grâce aux productions des SAF dominicains (Notaro *et al.*, 2019) et qui serait extrêmement supérieur aux 820 US\$.ha⁻¹.an⁻¹ mesurés dans les SAF boliviens (Armengot *et al.*, 2016). La faible proportion du cacao dans le GI (entre 15 et 43% suivant les prototypes) contraste fortement avec ce que l'on observe dans les SAF actuels, où cette part est de 63% (Notaro *et al.*, 2019). Cela indique peut-être une forte surestimation soit des rendements soit des prix d'achat en exploitation des produits provenant des plantes associées aux cacaoyers. Par ailleurs si l'on tient compte de la part de cacaoyers et de plantes associées productifs mesurée *in situ* (cf. Chapitre IV), soit respectivement 81% et environ 30% (42% arbres fruitiers et 18% des plantes non ligneuses), cela réduirait considérablement les rendements et donc le GI. Les prototypes permettraient alors de générer un GI compris entre 914 et 1279 US\$.ha⁻¹.an⁻¹ la première année de production, pour atteindre de 4288 à 4860 US\$.ha⁻¹.an⁻¹ en phase mature en prenant en compte les rendements et prix moyens.

La grande incertitude des performances agro-économiques attendues pour chaque prototype montre la limite de l'évaluation *ex ante* et le besoin de tester *in situ* les prototypes. C'est pourquoi, quelques producteurs volontaires ayant pris part au processus de conception ont installé (ou sont en cours

d'installation) les prototypes co-conçus. Au total, chaque prototype aura une superficie de 0.25 ha et sera mis en place six fois, la moitié sur des terrains nus, l'autre moitié à partir de SAF vieillissants. La réplication au nombre de trois pour chaque prototype (SAF neuf et SAF en rénovation) permettra de tirer des conclusions statistiques robustes sur la pertinence de chacun des quatre prototypes par rapport aux objectifs économiques fixés. Pour la transition d'un SAF vieillissant jusqu'au prototype, un travail considérable de préparation de la parcelle suivant le dispositif de plantation est à prévoir comme décrit dans le guide technique préparé par Deheuvels et Notaro (2019) mais non détaillé ici. Cela comprend notamment la sauvegarde de certains cacaoyers dont les rejets seront greffés avec des greffons correspondant aux variétés du prototype.

Inviter des professionnels d'autres secteurs que le cacao, comme par exemple des techniciens, ingénieurs ou commerciaux d'autres filières (fruits, légumes, épices, bois...) aurait certainement permis l'émergence d'innovations plus saillantes pour ces co-productions. Les connaissances de ces experts auraient augmenté la confiance des producteurs et par conséquent la probabilité d'acceptation des innovations, conduisant peut-être même à la signature d'accords commerciaux pour des marchés de niche (Meynard *et al.*, 2017; Berthet *et al.*, 2018).

III.5. CONCLUSION

La méthode de conception participative imaginée, et éprouvée auprès de professionnels dominicains de la filière cacao, aura abouti à l'élaboration de quatre prototypes génériques prometteurs. Des innovations techniques ont été mises à jour, dans le but d'augmenter les rendements et par conséquent le GI via de bons compromis entre production de cacao et autres productions, notamment sur le choix de combinaisons d'espèces dans le temps et dans l'espace. A présent, l'étape de l'évaluation « on farm » de prototypes nouvellement installés ou de rénovation de SAF anciens est indispensable pour permettre de confirmer ou non l'intérêt des prototypes. L'implication des producteurs dans les processus de conception et de mise en place des prototypes sur leur terrain, nous laisse espérer une bonne adoption des innovations techniques (et de leurs évolutions au fil du projet). Pour cela, la généricité initiale des prototypes devra peut-être laisser place à une flexibilité plus importante pour s'adapter aux conditions particulières de chaque exploitation.

CHAPITRE IV. INFLUENCE DE LA DENSITE, DE LA DISTRIBUTION SPATIALE ET DE CERTAINS TRAITS MORPHOLOGIQUES DES CACAOYERS ET DES ESPECES ASSOCIEES DANS DES SYSTEMES AGROFORESTIERS SUR LA PRODUCTIVITE DE CES DIFFERENTES CULTURES

IV.1. INTRODUCTION

Les systèmes agroforestiers tropicaux s'organisent généralement autour d'une espèce cultivée dominante, souvent adaptée pour se développer sous ombrage aussi appelée culture de rente, comme le caféier, l'hévéa ou encore le cacaoyer (Seghieri and Harmand, 2019). Les espèces cultivées qui y sont associées sont généralement diverses et variées, et avec des densités de plantation moindres (Deheuvels *et al.*, 2012 ; Jagoret *et al.*, 2017b ; Schneider *et al.*, 2017). Toutefois, cette diversité d'espèces cultivées associées assure de fait une variété importante de productions annexes comme des aliments, de l'énergie, du matériel de construction, des produits médicaux (Daily *et al.*, 1997), utiles pour les ménages agricoles soit en rentrant directement dans leur consommation soit en générant un revenu (Jagoret *et al.*, 2014b; Graefe *et al.*, 2017; Rigal *et al.*, 2018; Stroesser *et al.*, 2018). Cette diversité, sous certaines conditions de densité et de type de production, peut garantir la sécurité alimentaire des familles d'agriculteurs (Mbow *et al.*, 2014; Saj *et al.*, 2017b), et doit permettre une certaine résilience face aux aléas climatique (événements extrêmes tel qu'un ouragan) ou économique (chute soudaine du cours de la culture de rente principale) (Lehébel-Péron *et al.*, 2011; Altieri *et al.*, 2015; Saj *et al.*, 2017a; Jagoret *et al.*, 2018). Mais ce n'est pas toujours le cas comme le démontre l'hévéaculture et la cacaoculture où pour des raisons économiques et/ou culturelles les agriculteurs ont préféré délaisser sa culture en agroforesterie pour passer à un système de culture monospécifique (Feintrenie and Levang, 2009 ; Ruf, 2011).

A une échelle interparcellaire, on observe des variabilités de rendements entre culture de rente et cultures associées parfois importantes (Cerdeira *et al.*, 2014; Abdulai *et al.*, 2018b), quand bien même la structure des SAF ne varie pas tellement (Notaro *et al.*, 2019). De même à une échelle intraparcélaire, lorsque l'on observe des cacaoyers voisins, leur productivité peut énormément varier de zéro cabosses produites à plusieurs dizaines chaque année (Wibaux *et al.*, 2018). Cette variabilité a aussi été mise en évidence pour des cultures fruitières associées aux cacaoyers dans les SAF (Notaro *et al.*, 2019). Elle peut résulter de variations (i) de matériel végétal (variabilité génétique), (ii) des conditions « microclimatiques » comme les propriétés du sol et de lumière interceptée ou bien par (iii) des interactions entre individus comme par exemple des effets allélopathiques ((ii) et (iii) correspondant à de la variabilité environnementale). L'augmentation de la productivité d'un individu peut être déterminée par des facteurs « agroécologiques », liés à des interactions entre espèces cultivées au sein des SAF. Les traits fonctionnels des espèces cultivées peuvent être des indicateurs pertinents pour traduire ces facteurs agroécologiques (de Bello *et al.*, 2010). L'approche de prédiction de performance des espèces cultivées des SAF, dans notre cas leur productivité, par une approche fonctionnelle pourrait servir d'outil à la conception de SAF innovant (Damour *et al.*, 2015; Wood *et al.*, 2015).

Nos hypothèses d'étude sont que chaque espèce cultivée dans les systèmes agroforestiers devraient affecter positivement ou négativement la productivité d'autres espèces cultivées suivant (i) l'espèce et ses traits fonctionnels spécifiques, (ii) la densité de plantation et (iii) la distance entre individus. Nous nous proposons dans ce papier : (1) d'analyser les performances agroéconomiques des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers au travers de leur densité et diversité d'espèces cultivées à une échelle parcellaire afin de vérifier *in situ* les résultats du premier travail de recherche mené dans la

thèse (Notaro et al., 2019), (2) d'étudier les relations entre le rendement et les traits mesurés de chaque espèce et des plantes voisines directes à l'échelle de la plante pour mettre en évidence certains déterminants du rendement.

IV.2. MATERIEL & METHODES

IV.2.1. Localisation

Deux zones contrastées en terme de structure de SAF (Notaro et al, 2019) ont été choisies : les provinces de San Cristobal et Duarte, la première présentant une diversité de cultures associées plus importante et un rapport entre densité de cultures associées et densité de cacaoyers plus élevé que la deuxième. La sélection de parcelles d'étude variées en terme de diversité spécifique et de densité des différentes cultures a été facilitée par ces distinctions ce qui est pertinent dans le cadre de notre étude. En outre, la province de San Cristobal enregistre seulement 1,7% des surfaces de SAF à l'échelle nationale tandis que la province de Duarte en fournit 36,5% (Deheuvels, 2015).

IV.2.2. Conditions pédoclimatiques

Tableau 17. Valeurs moyennes de certaines variables pédologiques (\pm ET) pour les deux régions de Duarte et San Cristobal. La densité apparente a été mesurée sur les 20 premiers cm de sol, en prélevant un volume de sol de 0.565 dm³ (à l'aide d'un cylindre métallique de 6 cm de diamètre et 20 cm de hauteur).

	Duarte	San Cristobal
pH	6.3 \pm 0.5	6.1 \pm 0.3
Matière organique (%)	4.8 \pm 1.5	5.3 \pm 0.8
Taux d'argile (%)	53.4 \pm 8.2	34.4 \pm 5.8
CEC (méq/100g)	30.5 \pm 7.8	21.3 \pm 4.7
Ca ²⁺ (méq/100g)	22.6 \pm 7.3	14.5 \pm 3.3
Mg ²⁺ (méq/100g)	7.5 \pm 2.0	6.3 \pm 2.7
K ⁺ (méq/100g)	0.25 \pm 0.12	0.11 \pm 0.07
Na ⁺ (méq/100g)	0.11 \pm 0.05	0.38 \pm 0.12
Da (Densité apparente)	1.23 \pm 0.07	1.30 \pm 0.44

Les mesures de précipitations ont été fournies par l'ONAMET (Office National de Météorologie) correspondant à l'année d'étude pour les 2 stations météorologiques les plus proches des parcelles étudiées dans chaque région. Ces parcelles se trouvaient dans un périmètre de 14 km dans la province de Duarte et 21 km dans la province de San Cristobal. De mars 2018 à février 2019, le cumul annuel de précipitations s'est élevé à 2204 mm dans la province de Duarte et 1623 mm dans la province de San Cristobal.

Les données physico-chimiques des sols (Tableau 17) proviennent de prélèvements de sol effectués dans les dispositifs expérimentaux décrits dans le sous-chapitre suivant (un échantillon composite par dispositif), ayant été analysés par le laboratoire de l'IDIAF (Institut Dominicain de recherches agraires et forestières) : le pH a été déterminé par potentiométrie, la matière organique via la méthode de Walkley et Black par oxydation au dichromate de potassium, le taux d'argile a été calculé en utilisant un hygromètre de Bouyoucos, la CEC a été mesurée par conductimétrie, les bases interchangeables ont été quantifiées au moyen d'une extraction au NH₄OAc. Enfin la densité apparente a été déterminée via le séchage en étuve d'un volume de sol de 565,2 cm³, prélevé sur l'horizon de surface à l'aide d'un cylindre métallique de 20 cm de longueur et 6 cm de diamètre.

Le pH du sol dans les deux zones est légèrement faible ce qui indique des sols légèrement acides, tandis que la valeur de matière organique est relativement élevée signalant des sols fertiles (Tableau 17). Les

deux régions se distinguent aussi par le taux d'argile, la CEC et les valeurs des macronutriments (excepté Na+) qui sont plus élevés à Duarte qu'à San Cristobal. La densité apparente D_a est légèrement inférieure dans les SAF de Duarte comparativement à ceux de San Cristobal où on observe une variabilité importante des valeurs.

IV.2.3. Les dispositifs expérimentaux

Dans chacune des deux régions, 17 dispositifs de 1000m² de superficie (50m x 20m) ont été installés dans des parcelles de producteurs, soit un total de 34 dispositifs suivis. Les producteurs sélectionnés ont été proposés par nos partenaires locaux, la coopérative CONACADO et l'association de producteurs FUNDOPO, par rapport à l'implication de ces producteurs dans certains projets de développement de la cacaoculture menés par ces structures. Les dispositifs ont donc été mis en place chez des producteurs volontaires et de confiance afin de pouvoir réaliser notre travail sereinement sur du long terme. Chez chaque producteur, une parcelle mature où les cacaoyers sont considérés comme adultes avec une production « de croisière » relativement constante d'une année à l'autre, et facile d'accès a été choisie pour y installer les dispositifs expérimentaux. Les dispositifs ont été installés dans une zone considérée comme représentative de la parcelle par rapport à la densité et à la diversité des espèces, préférentiellement au centre de celle-ci afin d'éviter les effets de bord.

Les variables mesurées pour chacune des cultures des dispositifs sont d'ordre spatial, morphologique, agronomique et économique (Tableau 18). Dans chaque dispositif, la position de chaque plante a été relevée suivant un système de coordonnées cartésiennes planaires [X;Y] où X varie de 0 à 50m et Y de 0 à 20m. Les mesures ont été effectuées à l'aide de rubans métriques de 50m et 20m placés sur chaque côté du dispositif. Des projections orthogonales (à l'œil) ont été réalisées pour chaque plante pour déterminer ses coordonnées X et Y, nécessitant le travail de trois personnes, une désignant l'arbre, l'autre donnant la position X et la dernière donnant la position Y. Ces coordonnées permettent de calculer la distance entre deux plantes i et j d'après le théorème de Pythagore :

$$Dist\ ij = \sqrt{((X_i - X_j))^2 + (Y_i - Y_j)^2}$$

La surface terrière a été estimée en mesurant la circonférence des troncs d'arbre à l'aide d'un ruban métrique (i) à 30 cm de hauteur pour les cacaoyers et (ii) à hauteur de poitrine (DBH) soit à 1,30m au-dessus du sol pour les autres espèces ligneuses. La donnée de hauteur de la plante a été estimée à l'œil nu par une même personne, et comme pour la surface terrière uniquement mesurée pour les espèces ligneuses. L'âge de chaque plante a été fourni par le producteur.

Tableau 18. Variables mesurées pour toutes les plantes sur les 34 placettes d'étude.

Catégorie	Variable	Abréviation	Unité ou modalité
Géo-spatiale	Coordonnées axe x	X	m
	Coordonnée axe y	Y	m
	Distance entre plantes i et j	Dist _{ij}	m
Agronomie	Hauteur ⁽¹⁾	H	m
	Surface terrière ⁽¹⁾	BA	m ²
	Densité de plantation	d	individus.ha ⁻¹
	Age	Age	années
	Rendement	Yield	kg, nombre de fruits (fruitiers) planches (bois d'œuvre)
Economie	Chiffre d'affaire en cacao	CI	US\$.ha ⁻¹
	Chiffre d'affaire de la vente des produits associés	OPI	
	Valeur économique de l'autoconsommation	VDC	
	Valeur économique des produits associés (OPI + VDC)	VOP	
	Valeur économique globale (CI + OPI + VDC)	GI	
	Valeur économique de la production par individu	CA	US\$.individu ⁻¹

⁽¹⁾ Seulement pour les plantes ligneuses pérennes (dont cacaoyers)

IV.2.4. Estimation des performances agro-économiques

Avec l'accord de chaque producteur, toutes les deux semaines de mars 2018 à février 2019, nous sommes venus récolter les cacaoyers (abrégé **C**) et, dans la mesure du possible et les cultures associées (abrégé **PA**). Les récoltes ont ensuite été pesées. Très souvent la récolte des autres produits que le cacao était compliquée à réaliser pour des raisons logistiques : à cause de l'absence de matériel de récolte adéquat ou bien tout simplement parce que la production de l'arbre était vendue à un professionnel en charge de la récolte. A chaque venue sur le dispositif tous les quinze jours, le producteur était donc contacté pour savoir si d'autres produits que le cacao avaient été récoltés. Si oui, il nous indiquait la quantité pour les cultures concernées. Quelques photos descriptives de ce travail de récolte dans les dispositifs sont disponibles en Annexe 7.

Le nombre de fruits, le rendement correspondant (en kg) et le nombre de planches (dans le cas du bois d'œuvre) ont été répertoriés ainsi que la valeur économique associée à la vente ou à l'autoconsommation de ces produits. Pour le prix de vente du cacao, le prix moyen pour l'année 2018 a été retenu, soit 0.66US\$ par kilogramme de cacao frais. Pour l'estimation de la valeur économique des autres produits lorsqu'ils étaient consommés, les valeurs moyennes en 2017 du prix de vente en exploitation fournies par le ministère de l'agriculture ont été prises en compte (MA, 2017). Les quantités perdues, c'est-à-dire les fruits ayant muri puis pourri sur place ont aussi été relevées, afin de quantifier les pertes de rendement.

IV.2.5. Analyses statistiques

Des analyses statistiques descriptives visant à caractériser les SAF à base de cacaoyers dominicains et leurs performances agroéconomiques ont été réalisées sur les variables suivantes : la densité des cacaoyers, la densité et la diversité des cultures associées, leur répartition spatiale dans les dispositifs,

les rendements produits par chaque culture, les quantités vendues, autoconsommées ou perdues et les chiffres d'affaire qui en découlent. Sept groupes de cultures sont formés afin d'appuyer la suite de l'analyse, se distinguant par les services d'approvisionnement rendus et aussi par certains traits fonctionnels : (i) parmi les espèces ligneuses, il y a celles fournissant du bois d'œuvre (BOIS), celles fournissant des agrumes (CITRUS), celles fournissant d'autres fruits (FRUIT), celles fixant l'azote atmosphérique (FIXN), celles enfin produisant du cacao (COCOA) et (ii) parmi les non-ligneuses il y a les plantes vivrières (VIV) et les musacées (MUSA).

Dans un premier temps, une analyse comparative *in situ* des performances agro-économiques des SAF avec le diagnostic posé à partir de données déclaratives présenté par Notaro *et al.* (2019) a été effectuée. A nouveau trois types ont été formés, suivant un gradient de densité d'arbres associés, afin de comparer leurs performances agroéconomiques. Puis, à l'échelle de la plante, une étude des corrélations entre le rendement de chaque plante et (i) certains de ses traits fonctionnels (H, BA, Age), ainsi que (ii) les mêmes traits fonctionnels du cacaoyer et de la plante associée les plus proches, a été effectuée. Cela a permis de mettre en évidence l'influence de la plante elle-même et de ses voisins directs sur sa productivité.

Afin d'étudier l'effet des plantes voisines d'un cacaoyer sur son rendement en cacao, des modèles linéaires généralisés mixtes (GLMM) prenant en compte comme variables fixes le nombre de plantes de chaque groupe dans un rayon r autour de chaque cacaoyer et un effet aléatoire lié au dispositif (parcelle) ont été utilisés. Cinq rayons ont été explorés de 1 à 5 m par pas de 1 m. Ces GLMM s'écrivent comme suit :

$$\text{Yield}_{\text{COCOA } r} \sim (n_{\text{COCOA}} + n_{\text{BOIS}} + n_{\text{CITRUS}} + n_{\text{FRUIT}} + n_{\text{FIXN}} + n_{\text{VIV}} + n_{\text{MUSA}})_r + (1 | \text{plot})$$

où n est le nombre de plantes (compté pour chaque groupe), r le rayon autour du cacaoyer (de 1 à 5 m) et $1 | \text{plot}$ est l'effet aléatoire lié à la parcelle.

Cette approche permet de mettre en évidence des effets positifs ou négatifs sur le rendement en cacao des groupes de plantes suivant leur distance aux cacaoyers (Figure 29). Les corrélations entre le rendement et les autres variables mesurées ont été analysées via le package R « corrplot », le modèle

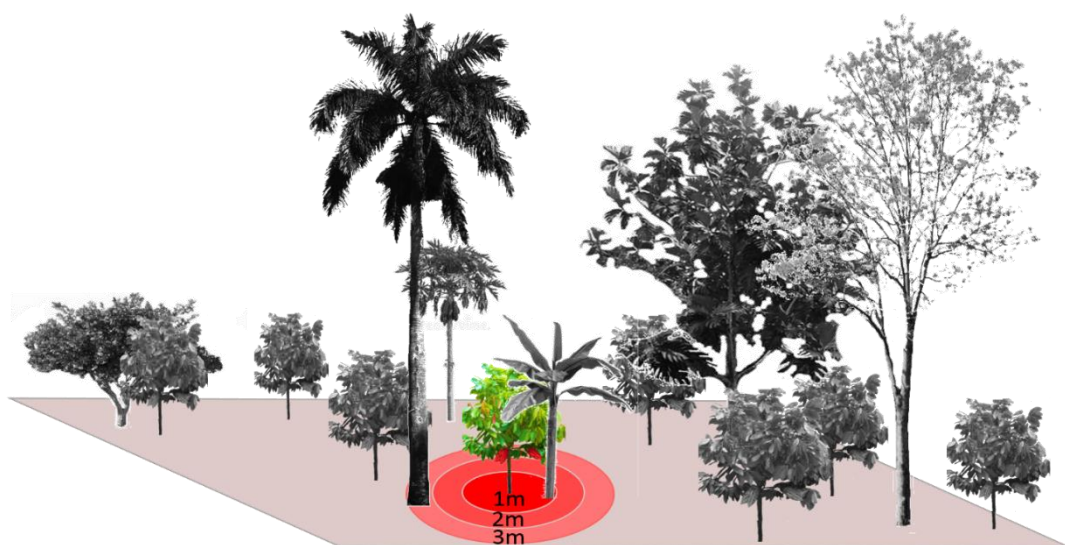


Figure 29. Schéma représentatif d'une portion de dispositif pour comprendre l'analyse effectuée avec le modèle mixte en fonction de la distance. Si le bord inférieur du schéma correspond au bord du dispositif, alors le rendement du cacaoyer coloré ne pourra être utilisé dans le modèle que pour les rayons r de 1, 2 et 3m. Dans un rayon de 1m de distance seule la musacée est intégrée au modèle ; dans un rayon de 3m s'ajoute le palmier.

mixte explicatif du rendement en cacao en fonction de la distance des autres groupes d'espèces a été étudié en utilisant le package « lmer ».

IV.3. RESULTATS

IV.3.1. Densité et diversité des espèces cultivées des SAF et leur influence sur la performance économique à l'échelle parcellaire

Les cacaoyers sont les plantes majoritairement présentes dans les systèmes agroforestiers (SAF) dominicains dans les deux régions confondues avec 860 cacaoyers par hectare en moyenne (Tableau 19). Viennent ensuite les cultures non ligneuses avec 202 plantes par hectare en moyenne, dont 124 sont des plantes vivrières (igname, ananas, taro) et 78 sont des musacées. Les arbres à production d'agrumes sont associés à hauteur de 50 arbres par hectare tandis que les autres fruitiers ligneux sont présents avec 60 arbres par hectare en moyenne. Enfin, dans une moindre importance, on retrouve les arbres à bois d'œuvre et les fixateurs d'azote avec respectivement 26 et 25 arbres par hectare en moyenne. La densité moyenne de plantes cultivées dans les SAF des deux régions est de 1223 plantes.ha⁻¹, ce qui signifie que la part des cacaoyers est de 70% de la densité totale de plantes. On observe une variabilité importante des densités des plantes associées, particulièrement de certains groupes d'espèces comme les FIXN, les FRUITS et les VIV pour lesquels l'écart type ET vaut le double de la moyenne ou presque.

Tableau 19. Effectif et densité des cacaoyers et des cultures associées, répartis en trois strates et sept groupes de cultures dans les 34 dispositifs des régions de Duarte et San Cristobal.

Composante	Strate	Groupe	Espèces	Nom commun	Effectif total	Densité moyenne individus.ha ⁻¹ (±SD)
Cacaoyers (C)	Cacao <i>Culture de rente principale</i>	COCOA	<i>Theobroma cacao</i>	Cacaoyer	2926	860 (± 102)
Cultures associées (PA)	AA (Arbres associés) <i>strate des plantes de taille supérieure ou identique aux cacaoyers</i>	CITRUS	<i>Citrus sinensis</i>	Oranger doux	98	50 (± 26)
			<i>Citrus aurantium</i>	Oranger amer	44	
			<i>Citrus paradisi</i>	Pamplemoussier	14	
			<i>Citrus reticulata</i>	Mandarinier	11	
			<i>Citrus latifolia</i>	Citronnier vert	1	
		FIXN	<i>Erythrina poeppigiana</i>	Erythrine	48	25 (± 25)
			<i>Gliricidia sepium</i>	Gliricide	33	
		Fixing Nitrogen	<i>Acacia mangium</i>	Acacia	1	
			<i>Tamarindus indica</i>	Tamarinier	1	
			<i>Cassia fistula</i>	Canéfier	1	
		FRUIT autres fruitiers qu'agrumes (CITRUS)	<i>Persea americana</i>	Avocatier	40	60 (± 47)
			<i>Coffea arabica</i>	Caféier	30	
			<i>Pouteria sapote</i>	Sapotillier	27	
			<i>Artocarpus altilis</i>	Fruit à pain	17	
			<i>Annona muricata</i>	Corossolier	11	
			<i>Bixa orellana</i>	Roucou	11	
			<i>Mangifera indica</i>	Manguier	10	
			<i>Carica papaya</i>	Papayer	9	
			<i>Cocos nucifera</i>	Cocotier	8	
			<i>Artocarpus communis</i>	Châtaigner pays	8	
			<i>Anacardium occidentale</i>	Anacardier	6	
			<i>Psidium guajava</i>	Goyavier	5	
			<i>Spondias mombin</i>	Prunier mombin	5	
			<i>Pimenta racemosa</i>	Bois d'Inde	3	
			<i>Annona reticulata</i>	Anone	3	
			<i>Genipa americana</i>	Jagua	2	

Cultures associées (PA)	AA (Arbres associés) <i>strate des plantes de taille supérieure ou identique aux cacaoyers</i>	FRUIT autres fruitiers qu'agrumes (CITRUS)	<i>Blighia sapida</i>	Aki	2	
			<i>Annona cherimola</i>	Chérimolier	2	
			<i>Malpighia emarginata</i>	Acérola	1	
			<i>Chrysophyllum cainito</i>	Caïmitier	1	
			<i>Crescentia cujete</i>	Calebassier	1	
			<i>Melicoccus bijugatus</i>	Quenettier	1	
			<i>Spondias cytherea</i>	Prunier de Cythère	1	
			<i>Moringa oleifera</i>	Moringa	1	
			Unidentified	-	1	
	BOIS		<i>Roystonea hispaniolana</i>	Palmier royal	40	26 (± 14)
			<i>Colubrina arborescens</i>	Corazon de paloma	11	
			<i>Cedrela odorata</i>	Acajou amer	9	
			<i>Nectandra hihua</i>	Cigua	9	
			<i>Simarouba glauca</i>	Juan primero	4	
			<i>Hura crepitans</i>	Sablier des Antilles	3	
			<i>Swietenia macrophylla</i>	Acajou du Honduras	2	
			<i>Spirotecoma rubriflora</i>	Capá	2	
			<i>Guazuma tomentosa</i>	Bois d'orme	2	
			<i>Cupania americana</i>	Guarano	2	
			<i>Swietenia mahagoni</i>	Acajou des Antilles	1	
			<i>Ocotea floribunda</i>	Cigua prieta	1	
			<i>Karwinskia caloneura</i>	Cuerno de buey	1	
			<i>Chrysophyllum argenteum</i>	Akoma	1	
			Unidentified	-	1	
	PNL (Plantes non ligneuses) <i>strate des plantes de taille inférieure ou identique aux cacaoyers</i>	MUSA	<i>Musa sapientum</i>	Banane dessert	166	78 (± 38)
			<i>Musa paradisiaca</i>	Banane plantain	65	
			<i>Musa corniculata</i>	Rulo	33	
		VIV	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Taro	313	124 (± 85)
			<i>Ananas comosus</i>	Ananas	76	
			<i>Dioscorea alata</i>	Igname	28	
		Cultures vivrières	<i>Manihot esculenta</i>	Manioc	2	
			<i>Zingiber officinale</i>	Gingembre	1	
			<i>Cucurbita maxima</i>	Potiron	1	

La Figure 30 donne un aperçu de la diversité et de la distribution spatiale des associations de cultures dans les 34 dispositifs. On observe par exemple une densité élevée d'arbres fruitiers (FRUIT) dans la parcelle SC18 alors qu'on observe plus d'arbres fixateurs d'azote (FIXN) chez D10b ou bien d'agrumes (CITRUS) chez SC43. Certains producteurs associent des plantes vivrières (VIV) entre les cacaoyers comme dans la parcelle SC02a, tandis que d'autres laissent un espace relativement important entre par exemple des arbres à bois d'œuvre (BOIS) et les cacaoyers pour la parcelle SC04a. Les musacées (MUSA) sont parfois regroupées dans un même espace du dispositif comme on le voit pour la parcelle D07a.

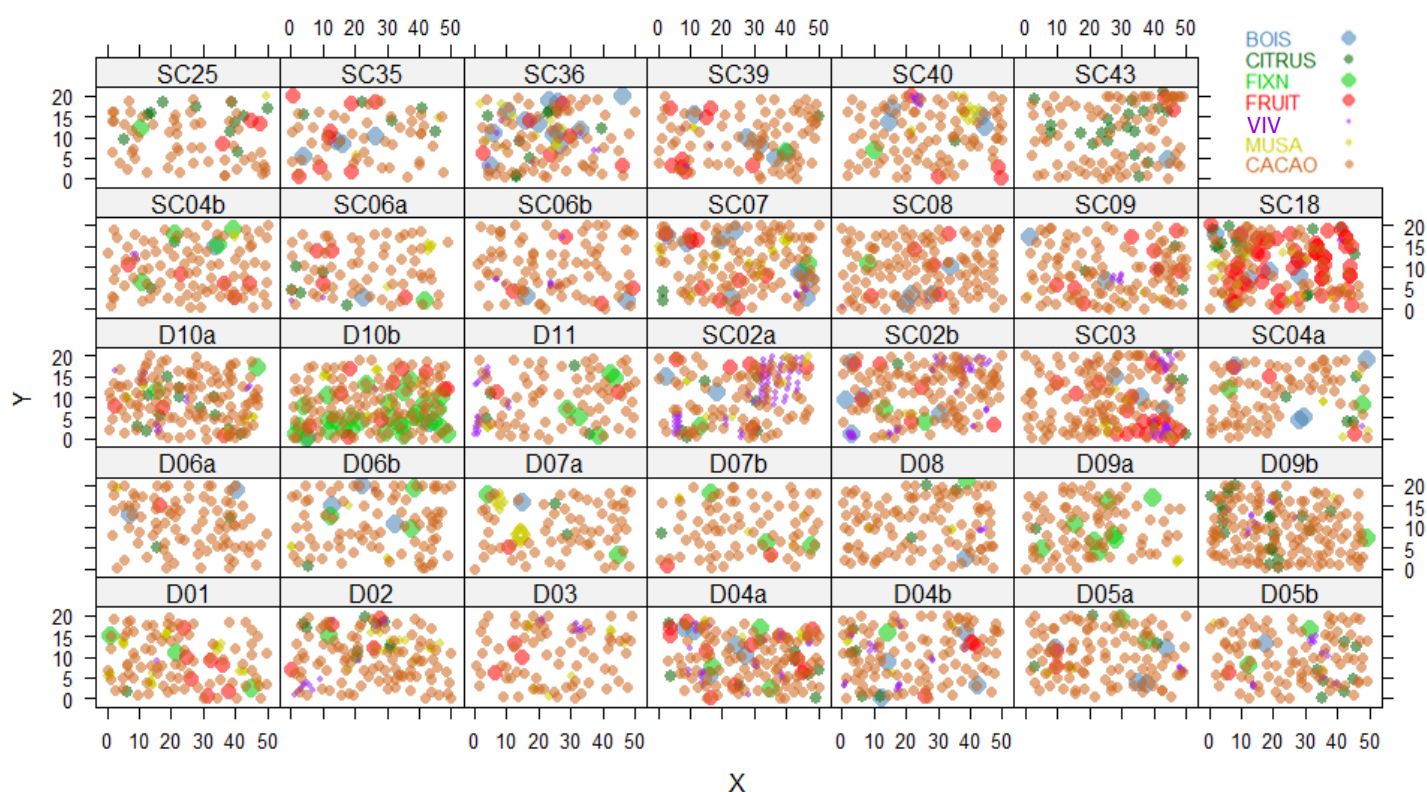


Figure 30. Cartes schématiques détaillant la disposition des plantes suivant leur groupe dans chacun des 34 dispositifs rectangulaires de 50 m de long (axe X) et de 20 m de large (axe Y). Les étiquettes des cartes commencent par les lettres SC pour la région de SC pour la région de San Cristobal et D pour la région de Duarte.

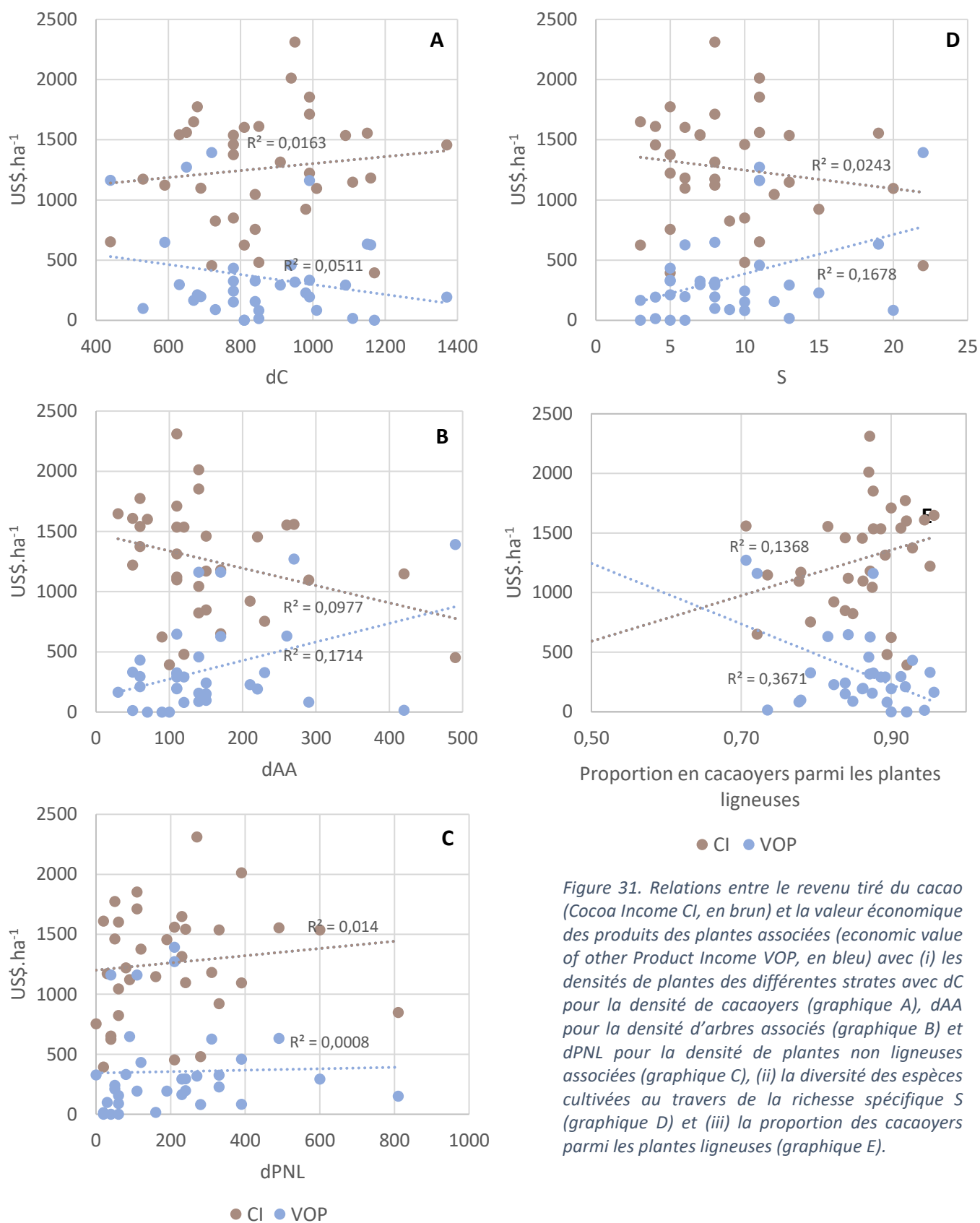


Figure 31. Relations entre le revenu tiré du cacao (Cocoa Income CI, en brun) et la valeur économique des produits des plantes associées (economic value of other Product Income VOP, en bleu) avec (i) les densités de plantes des différentes strates avec dC pour la densité de cacaoyers (graphique A), dAA pour la densité d'arbres associés (graphique B) et dPNL pour la densité de plantes non ligneuses associées (graphique C), (ii) la diversité des espèces cultivées au travers de la richesse spécifique S (graphique D) et (iii) la proportion des cacaoyers parmi les plantes ligneuses (graphique E).

Les densités de plantes des différentes strates (dC pour la densité de cacaoyers, dAA pour la densité d'arbres associés et dPNL pour la densité de plantes non ligneuses associées) n'influencent pas de la même façon les chiffres d'affaire issus de la vente de cacao ou des produits des cultures associées :

- la densité de cacaoyers n'a pas vraiment d'influence sur le CI, mais elle influence négativement le VOP bien que la corrélation soit très faible (figure 31A).
- la densité des plantes associées ligneuses implique un compromis, car elle impacte positivement le VOP mais négativement le CI (figure 31B).
- la densité des plantes associées non ligneuses n'influencent ni le CI, ni le VOP (graphique C).

On se rend d'autant plus compte de ce compromis entre espèces ligneuses fruitières et cacaoyers lorsqu'on regarde le CI et le VOP en fonction de la proportion de cacaoyers (graphique D). Enfin, la corrélation positive ($R^2 = 0,55$), qui existe entre la densité et la richesse spécifique des arbres ligneux associés (données non présentées), implique que la richesse spécifique des cultures associées influence positivement le PAB (graphique D). Toutefois, la richesse spécifique n'est pas corrélée avec le CI.

Ce compromis observé entre CI et VOP lorsque la densité de cultures associées ligneuses augmente nous motive à former trois types suivant un nombre croissant de plantes ligneuses associées aux cacaoyers (dAA) afin d'étudier leurs performances agroéconomiques (Figure 32). Comme pour le diagnostic agroéconomique effectuée selon une approche mixte (Chapitre II), aucune différence significative du GI (Global Income) n'est observée entre les trois types. Même plus, aucune différence significative inter-types n'apparaît ni entre les CI, ni entre les OPI ni entre les VDC (Figure 32). Le GI moyen est compris entre 1468 US\$.ha⁻¹.an⁻¹ pour le SAF de densité faible en cultures associées, et 1702 US\$.ha⁻¹.an⁻¹ pour le SAF de densité intermédiaire en cultures associées, très proche des 1674 US\$.ha⁻¹.an⁻¹ atteints par les SAF de densité forte en cultures associées.

On observe une baisse de CI entre les types de densités intermédiaire et forte en cultures associées. Toutefois, on remarque aussi une augmentation d'OPI et de VDC lorsque la densité en cultures associées augmente au sein des SAF. Et même, des différences significatives sont observées entre les trois types pour le VOP (Tableau 20).

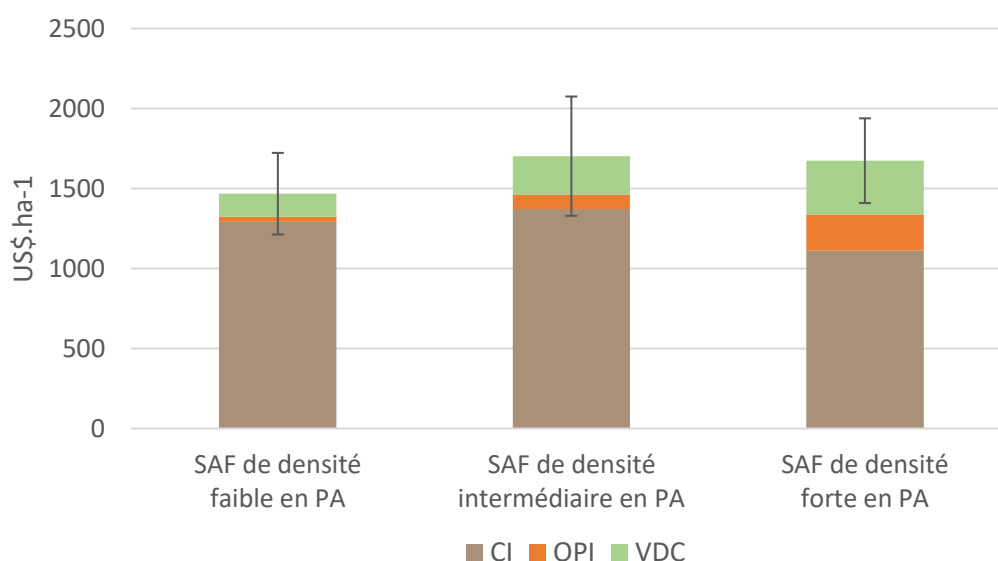


Figure 32. Histogramme des revenus tirés du cacao (CI) et des cultures associées (OPI) et de l'autoconsommation (VDC) cumulés pour les trois types formés suivant un gradient de densité d'arbres associés.

Tableau 20. Caractéristiques de chaque type de SAF : CI, VOP, d, S et Age (moyenne \pm ET). La variable d de densité est déclinée suivant les trois différentes composantes (AA arbres associés, PNL plantes non ligneuses associées et cacaoyers). Les lettres a, b et c permettent de distinguer les différences significatives entre types évaluées via le test de Student t-test.

Variable	Types					
	Dispositifs de densité faible (n = 11)		Dispositifs de densité intermédiaire (n = 12)		Dispositifs de densité forte (n = 11)	
CI	1291 (\pm 438)	-	1371 (\pm 545)	-	1113 (\pm 381)	-
PAB	176 (\pm 155)	b	331 (\pm 311)	ab	561 (\pm 499)	a
dcacao	817 (\pm 160)	-	838 (\pm 167)	-	928 (\pm 270)	-
dAA	72 (\pm 27)	c	128 (\pm 18)	b	282 (\pm 167)	a
dCITRUS	19 (\pm 21)	b	43 (\pm 32)	ab	85 (\pm 69)	a
dFIXN	23 (\pm 25)	-	16 (\pm 11)	-	36 (\pm 88)	-
dFRUIT	17 (\pm 17)	b	46 (\pm 18)	ab	117 (\pm 152)	a
dBOIS	13 (\pm 13)	b	23 (\pm 19)	ab	44 (\pm 38)	a
dPNL	121 (\pm 95)	-	262 (\pm 243)	-	218 (\pm 154)	-
dMUSA	55 (\pm 68)	-	84 (\pm 85)	-	94 (\pm 75)	-
dVIV	66 (\pm 84)	-	178 (\pm 240)	-	122 (\pm 135)	-
S	5.2 (\pm 1.5)	b	9.6 (\pm 1.9)	a	12.4 (\pm 6.1)	a
ageC	30.3 (\pm 7.3)	-	25.2 (\pm 9.6)	-	22.4 (\pm 11.4)	-

Les types ont été fondés à partir des densités d'arbres associés (dAA). Il n'est donc pas surprenant de voir des différences significatives inter-types concernant cette variable (Tableau 20). Les différences sont significatives pour les densités de cultures pouvant générer des revenus comme les fruitiers (agrumes et autres) et les arbres à bois d'œuvre, uniquement entre les deux types extrêmes de densité faible et forte en AA. Etant donné la corrélation entre dAA et richesse spécifique (S), on observe aussi une différence significative de diversité spécifique (S) entre types, mais cette fois-ci entre le type de dAA faible et celui de dAA intermédiaire. Ni la densité en cacaoyers (dC) ni la densité en plantes non ligneuses (dPNL), ni l'âge moyen des cacaoyers (ageC) ne diffèrent statistiquement entre les trois types.

IV.3.2. Performances agroéconomiques des espèces cultivées : mesures de la productivité agronomique et de la valeur économique à l'échelle de la plante et du groupe d'espèces

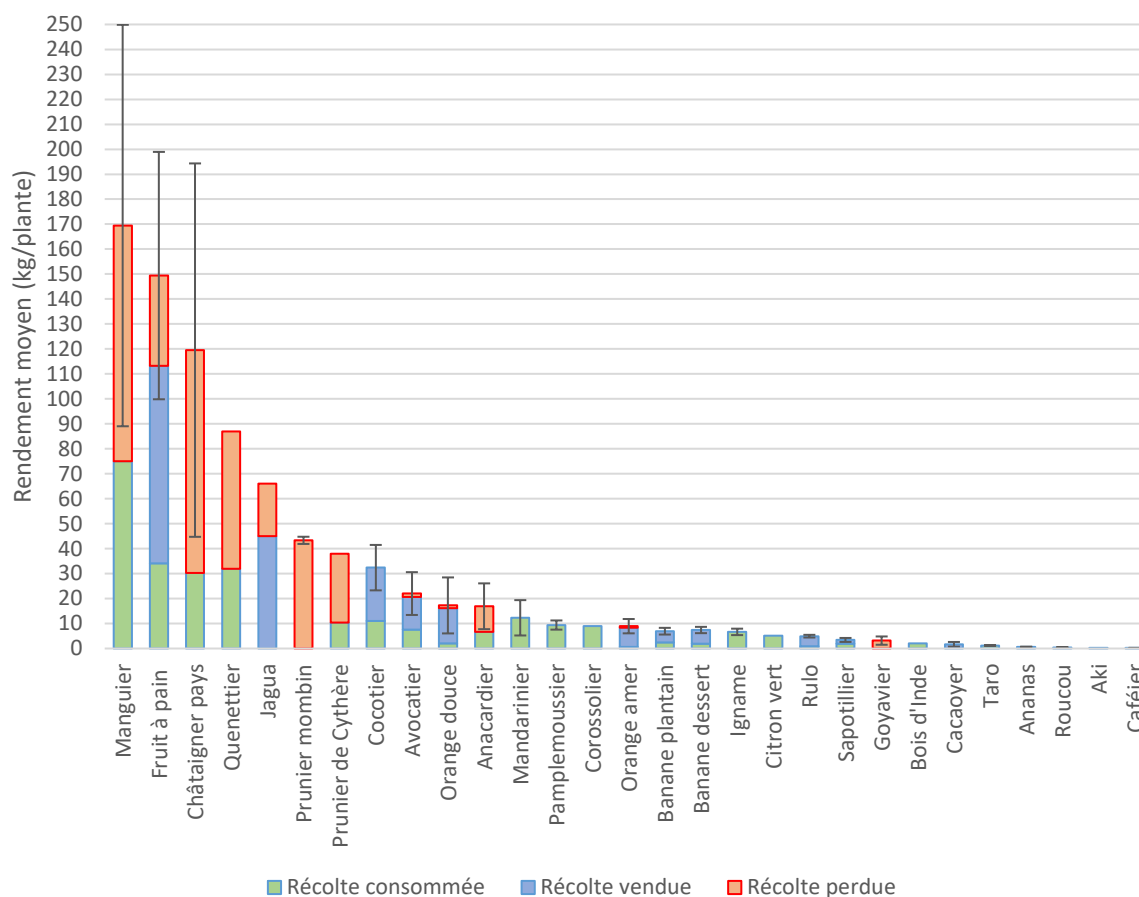


Figure 33. Rendement moyen par plante productive (kg) mesuré ou estimé dans l'ensemble des dispositifs suivant un ordre décroissant. Quand les barres d'erreur sont absentes, cela indique que la mesure provient d'une seule et unique plante. Pour les arbres à bois productifs.

Les rendements des différentes espèces associées au cacaoyer en terme de masse par plante varient fortement (Figure 33). Les grands fruitiers mesurant parfois plusieurs dizaines de mètres de hauteur tels que le manguier, le fruit à pain, le châtaigner pays, jagua, et quenettier produisent des quantités de fruits relativement importantes, de 65 à 170 kg par arbre. En revanche, les plus petits ligneux et les plantes vivrières ont des rendements plus faibles compris entre 0,5 à 4 kg par plante. Les agrumes et les musacées ont des productions moyennes comprises entre 5 et 10 kg par plante.

La récolte utile, consommée directement par le producteur et sa famille ou bien vendue, n'est pas répartie également entre les espèces. On remarque que le manguier, le fruit à pain, le châtaigner pays, le quenettier, le cocotier, le mandarinier, le pamplemoussier, le citronnier, l'igname fournissent des produits très prisés dans l'alimentation du producteur et de sa famille. On remarque l'existence de marchés pour des espèces particulières comme le fruit à pain, le jagua, le cocotier, l'avocatier, l'oranger (amer et doux) ainsi que pour les musacées.

Tableau 21. Présentation des effectifs d'espèces et de plantes suivant leur nombre total et leur nombre en production ainsi que le chiffre d'affaire moyen pour chacun des 7 groupes de cultures.

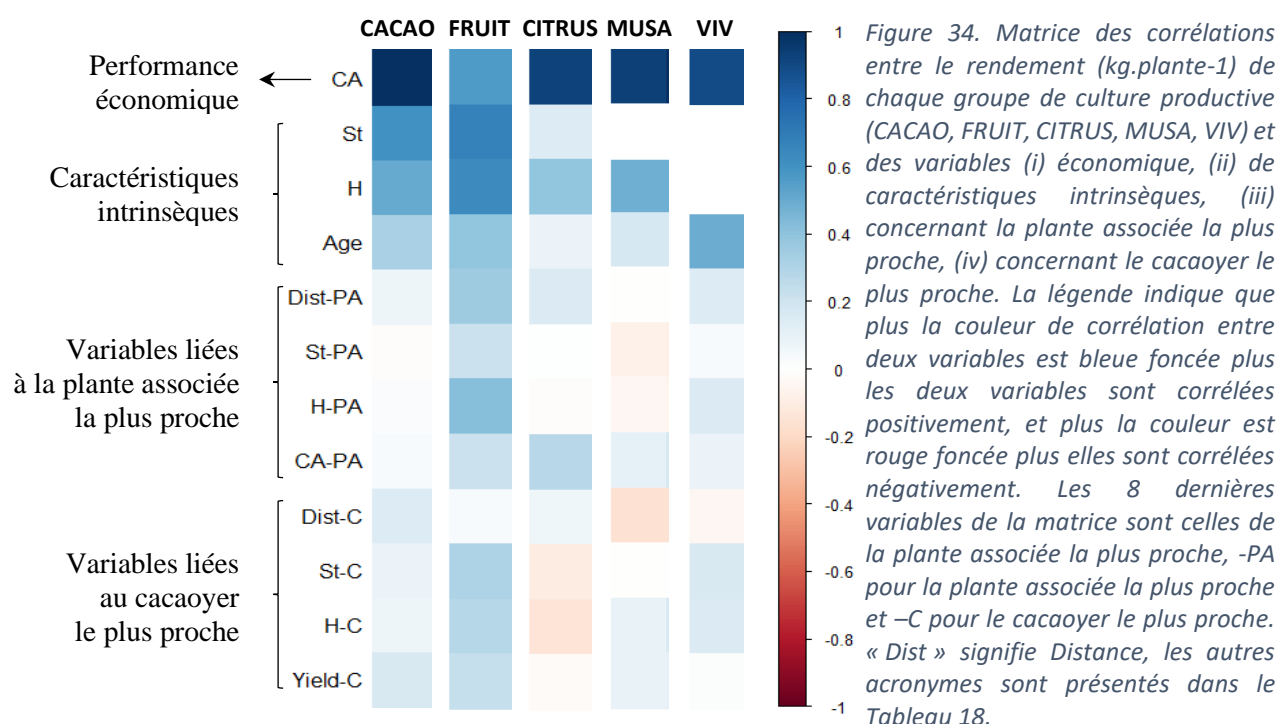
Groupe	Nombre total d'espèces	Nombre d'espèces productives	Nombre total de plantes	Nombre de plantes productives	Proportion de plantes productives	CA moyen par plante productive	CA moyen par plante
COCOA	1	1	2926	2375	81%	1.7 US\$.tree ⁻¹	1.4 US\$.tree ⁻¹
CITRUS	5	5	168	69	41%	5.9 US\$.tree ⁻¹	2.4 US\$.tree ⁻¹
FIXN	4	0	83	0	0%	-	-
FRUIT	25	17	207	88	43%	5.3 US\$.tree ⁻¹	2.3 US\$.tree ⁻¹
TIMBER	16	2	89	7	8%	20 US\$.tree ⁻¹	1.6 US\$.tree ⁻¹
MUSA	3	3	264	71	27%	2.2 US\$.plant ⁻¹	0.6 US\$.plant ⁻¹
VIV	6	3	421	47	11%	1.1 US\$.plant ⁻¹	0.1 US\$.plant ⁻¹

Tous les groupes fournissent des services de production alimentaire (COCOA, CITRUS, FRUIT, MUSA, VIV) ou de production de matériau de construction ou d'artisanat (TIMBER), excepté les arbres fixateurs d'azote (FIXN) pour lesquels aucune production n'est autoconsommée ni vendue.

Le groupe où on observe la proportion la plus élevée de plantes productives est celui des cacaoyers (COCOA) avec 81%. Le chiffre d'affaire moyen généré par les cacaoyers productifs s'élève à 1,7 US\$.plante⁻¹ (Tableau 21). La proportion de plantes productives est plus élevée chez les agrumes (CITRUS) et autres fruitiers (FRUIT), respectivement 41% et 43%, que chez les plantes non ligneuses (MUSA et VIV) où cette proportion tombe respectivement à 27 et 11%. Au total sur l'année, 8% des arbres à bois d'œuvre (BOIS) ont été débités. Ces derniers sont ceux qui rapportent le plus, grâce à des produits ayant une valeur ajoutée supérieure à celles des fruits et tubercules produits par les autres cultures. Les agrumes et autres fruitiers fournissent une production représentant entre 5 et 6 US\$.plante⁻¹ en moyenne tandis que les plantes non ligneuses de la strate inférieure génèrent des chiffres d'affaire entre 1,1 et 2,2 US\$.plante⁻¹.

Le fait que 81% des cacaoyers soient productifs induit qu'il n'y a qu'un écart léger entre le CA par cacaoyer productif et le CA par cacaoyer : on passe de 1.7 à 1.4 US\$.tree⁻¹. En revanche, le CA par plante productive des cultures associées est divisé par un facteur 2 à 10 si l'on regarde le CA moyen à l'échelle de toutes les plantes de chaque groupe.

IV.3.3. Déterminants de la performance agroéconomique



Le rendement de chacune des plantes de chaque groupe est généralement très corrélé à la valeur économique (CA) obtenue par la vente ou l'autoconsommation des produits, même si cela est un peu nuancé pour le groupe FRUIT car il y a plus de variabilité du paramètre prix de vente des productions par unité de masse pour ce groupe (Figure 34). On remarque que ce sont les caractéristiques intrinsèques qui sont les plus corrélées au rendement parmi tous les groupes. Chez les cacaoyers et chez les fruitiers, les traits morphologiques de surface terrière et hauteur sont corrélés positivement au rendement en cacao. Pour les groupes CITRUS et MUSA, la hauteur est la variable la plus corrélée au rendement tandis que chez les cultures vivrières on observe un lien entre l'âge et la productivité, étant donné que ces cultures n'ont pas de données pour les variables St et H.

Pour chaque groupe, on observe des corrélations plus ténues entre les rendements et les variables autres qu'intrinsèques, autrement-dit celles qui sont liées au cacaoyer et plante associée les plus proches (Figure 34). Concernant le rendement en cacao par plante, ce sont les variables liées au cacaoyer le plus proche qui sont plus corrélées que celles liées à la plante associée la plus proche. Il est corrélé positivement avec le rendement en cacao du plus proche voisin. Autrement dit si un cacaoyer voisin est productif, alors le cacaoyer considéré devrait fournir un rendement intéressant. Par ailleurs, il est corrélé positivement avec la distance du cacaoyer mais aussi avec la plante associée la plus proche. Cela signifie que plus le cacaoyer et la plante associée la plus proche sont distants, meilleur est le rendement du cacaoyer.

Pour le rendement des plantes associées, les corrélations dépendent des groupes de cultures. Pour le groupe FRUIT, toutes les variables sont corrélées positivement de façon plus ou moins intense, exceptée la distance aux cacaoyers. Pour le groupe CITRUS, le rendement est corrélé positivement avec la valeur économique des produits (CA) de la plante la plus proche, mais semble corrélé négativement avec les traits morphologiques du cacaoyer le plus proche (St et H), caractéristique de sa vigueur. Pour les cultures de la strate inférieure, on observe une corrélation légèrement négative entre le rendement de MUSA avec la distance des cacaoyers, suggérant un effet de facilitation de ces derniers sur la productivité des bananiers.

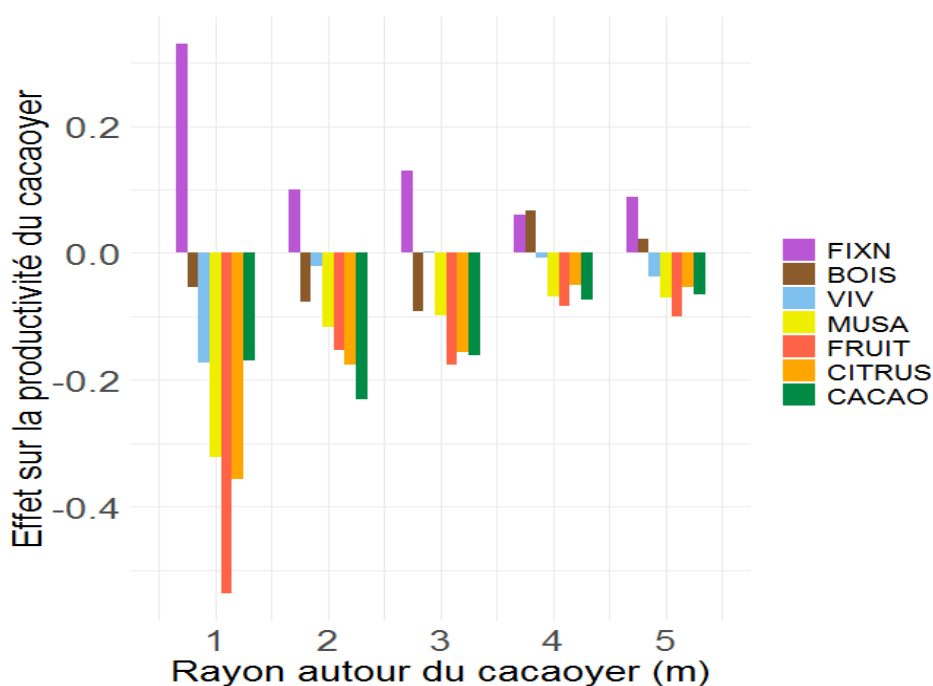


Figure 35. Effet du nombre de plantes de chaque groupe dans le voisinage du cacaoyer (de 1 à 5 m de rayon) sur la productivité du cacaoyer.

La Figure 35 nous permet d'apprécier plus en détail les groupes de cultures facilitant ou au contraire affaiblissant la productivité des cacaoyers. Les effets de chaque groupe, qu'ils soient positifs ou négatifs, sont décroissants quand on s'éloigne du cacaoyer. On observe des effets négatifs importants des MUSA, CITRUS et FRUIT à 1 m de distance : la présence d'une plante supplémentaire de chacun de ces 3 groupes dans ce rayon autour du cacaoyer ferait baisser sa productivité de 32% à 53%. A cette distance toujours, un cacaoyer ou une plante vivrière supplémentaire ferait diminuer le rendement du cacaoyer de 18%, tandis que la présence d'un arbre à bois aurait un effet quasi nul. En revanche la présence d'une légumineuse ferait augmenter le rendement cacao de 33%.

En s'éloignant des cacaoyers les effets s'atténuent donc globalement, excepté pour le cacaoyer, qui à 2 m de distance a un effet négatif accru (-22% sur la productivité). A partir de 4m de distance, l'influence des arbres à bois d'œuvre devient légèrement positive, tandis que les arbres fruitiers ont l'effet le plus délétère (-18 à -20% sur la productivité).

IV.4. DISCUSSION

IV.4.1. L'intérêt économique de densifier et diversifier les cultures associées

Les rendements moyens en cacao sont légèrement supérieurs à ceux précédemment relevés par Notaro *et al.* (2019) : 732 vs 666 kg.ha⁻¹ (cacao sec). Les CI moyens sont plus faibles avec 1262 vs 1542 US\$.ha⁻¹.an⁻¹ respectivement, dû à une chute importante des cours du cacao entre 2016 et 2018. Par ailleurs, on observe une très nette différence quel que soit le groupe concernant les chiffre d'affaire provenant des cultures associées, avec un VOP environ deux fois plus faible lorsque mesuré en parcelle par rapport aux données déclaratives. Cela peut en partie s'expliquer par des données fournies surestimées lors des entretiens de Notaro *et al.* (2019). Au final, il s'avère quand même plus bénéfique de cultiver des SAF incluant un nombre relativement important d'arbres associés, qui plus est d'espèces différentes. D'après les performances agroéconomiques des deux groupes aux densités d'AA les plus élevées, une densité comprise entre 128 et 282 AA.ha⁻¹ et une richesse spécifique des plantes associées de 9 à 13 espèces semblent être les SAF fournissant le GI le plus élevé. Si la densité concorde bien avec les résultats de Notaro *et al.* (2019), la richesse spécifique est bien plus élevée. Ceci peut en partie s'expliquer par le fait que cette précédente étude ne différenciait pas les espèces d'orangers (amer et doux), ni les bananiers (dessert, plantain ou Rulo), et ne tenait pas compte des cultures vivrières (VIV).

Cependant, une part très faible des plantes associées s'avère productive, particulièrement pour les cultures non ligneuses situées sous la strate supérieure et la strate intermédiaire des SAF. A peine 27% et 11% des musacées et plantes vivrières ont été productives au cours de l'année d'étude. Ces chiffres peuvent s'expliquer par (i) des plantes n'ayant pas pu terminer leur cycle de production car peu adaptées à l'environnement parcellaire (propriétés du sol, luminosité) et (ii) des blessures causées par des animaux, comme par exemple les tiges de Taro becquetées par des poules évoluant en liberté dans les parcelles (communication personnelle de producteurs). Pour les plantes ligneuses fruitières (FRUIT et CITRUS) on observe un taux de production plus élevé, en moyenne de 42%, mais cela implique que plus de la moitié de ces arbres sont improductifs ! Les raisons possibles de ces résultats sont que ces arbres sont soit inadaptés aux conditions environnementales, soit malades et/ou vieillissants. D'autres facteurs ne sont pas à exclure car certains producteurs nous ont mentionné une productivité importante de certains arbres l'année précédente alors qu'aucun fruit n'a pu être récolté lors de notre année d'étude. Bien que le bois d'œuvre ait généralement une valeur ajoutée beaucoup plus élevée que les productions fruitières, on observe ici que le bénéfice par arbre coupé correspond seulement à quatre années de production moyenne d'un arbre fruitier. C'est peu, mais cela s'explique par le fait que le bois coupé était destiné à des proches des producteurs propriétaires de ces arbres.

On remarque une variabilité importante de la densité de certains groupes de cultures associées dans les SAF, particulièrement FIXN, FRUIT et VIV. Cela indique que les producteurs ne gèrent pas de la même façon les espèces associées aux cacaoyers. En revanche, la densité des cacaoyers, des arbres à bois d'œuvre, des agrumes et des *Musaceae* sont relativement stables dans les SAF dominicains. Les stratégies de production sont donc contrastées, par exemple, entre un producteur associant particulièrement des *Fabaceae* et un autre favorisant des espèces fruitières. Le premier se focalise sur un revenu très dépendant de la production de cacao tandis que le second tend vers une diversification de ses sources de revenus. Mais les stratégies observées dans les trois types sont toutes insuffisantes par rapport au revenu encore trop faible, le GI étant compris entre 1468 et 1702 US\$.ha⁻¹.an⁻¹. Les producteurs de l'étude ayant en majorité de petites surfaces, une part importante d'entre eux ont par conséquent des conditions de vie parfois très précaires (Notaro et al, 2019).

IV.4.2. Un rendement déterminé par des traits intrinsèques plus que ceux des plantes voisines

La productivité des cacaoyers comme des cultures associées dépend principalement de déterminants intrinsèques. Les traits morphologiques comme la surface terrière et la hauteur des cacaoyers ont des bons niveaux de corrélation avec le rendement en cacao. Cela est compréhensible étant donné que les coussinets floraux d'où émergent les fleurs qui donneront des cabosses se trouvent directement à la surface de l'écorce des cacaoyers. Par conséquent, plus la surface d'écorce de l'arbre augmente, plus l'effectif de coussinets floraux par cacaoyer devrait augmenter. En revanche pour les cultures associées, c'est plutôt la hauteur de la plante et son âge qui influenceront positivement le rendement, même si la surface terrière est corrélée positivement avec la productivité du groupe FRUIT.

Pour les groupes des strates les plus hautes, c'est-à-dire CACAO, FRUIT et CITRUS, plus la distance entre plantes est élevée, meilleur est le rendement. Cela suggère des phénomènes de compétition entre plantes lorsque celles-ci sont rapprochées. Le rendement en cacao faiblit lorsque des cultures destinées à la production d'aliments (CACAO, FRUIT, CITRUS, MUSA et VIV) sont associées dans son voisinage direct (rayon < 3m), ce qui pourrait s'expliquer par des phénomènes de compétition pour (i) la lumière par rapport au groupe FRUIT et un peu CACAO et CITRUS, mais essentiellement pour (ii) l'accès aux nutriments du sol. Pour le groupe FIXN on observe un effet positif sur le rendement cacao, spécialement si la/les plantes se trouvent dans un rayon de 1 m du cacaoyer. Ce résultat suggère la possibilité de « symbiose » entre ces deux groupes, ayant lieu probablement au niveau racinaire et permettant un apport optimal en azote aux cacaoyers.

La faible influence mesurée des communautés végétales dans le voisinage du cacaoyer sur son rendement sous-entend que les déterminants du rendement en cacao sont certainement plus liés à des facteurs génétiques. En effet, dans des environnements similaires, pour des cacaoyers relativement semblables au niveau phénotypique nous observons des disparités importantes de productivité. Cela indique que le génome des cacaoyers productifs est doté de certains gènes impliqués dans la productivité du cacaoyer, dont l'expression est favorisée dans les conditions environnementales de son habitat (conditions pédoclimatiques).

IV.4.3 Des analyses à deux échelles d'approche comme outil d'aide à la conception

L'approche agrégée au niveau de la parcelle et l'approche plus fine à l'échelle de groupe de cultures nous apportent au moins six informations complémentaires qui sont utiles à la co-conception. La première nous informe sur des intervalles optimaux de densité et de diversité d'espèces : (1) des densités comprises entre 128 et 282 AA.ha⁻¹, dont un dCITRUS compris entre 43 et 85 arbres.ha⁻¹, dFRUIT compris entre 46 et 117 arbres.ha⁻¹, dBOIS compris entre 23 et 44 arbres.ha⁻¹, avec une densité de PNL n'influençant pas les productivités ; (2) de 9 à 13 espèces différentes associées dans les SAF.

L'approche plus fine d'analyse des performances agro-économiques à l'échelle des groupes de culture nous montre que (3) les arbres fixateurs d'azote atmosphérique dans le sol ont des effets bénéfiques sur la productivité des cacaoyers, et donc qu'il peut être important d'en associer dans les SAF où ils sont inexistant ; (4) que les arbres à bois ont peu d'effet sur la productivité des cacaoyers, même à très faible distance (dès 1m), dont certains peuvent avoir une bonne valorisation (Somarriba *et al.*, 2010) ; (5) les plantes ligneuses ou non cultivées ayant une fonction de production d'aliments portent préjudice au rendement des cacaoyers, surtout à des distances inférieures à 3m (à 1m pour les plantes vivrières).

Enfin l'approche au niveau de chaque espèce végétale et de la destinée de leur production (perte, autoconsommation ou vente), nous permet de recommander certaines espèces ayant des débouchés commerciaux (Sonwa *et al.*, 2014) : (6) parmi les FRUIT, le fruit à pain, le jagua, le cocotier, l'avocatier

et le corossolier, parmi les CITRUS tous leurs fruits (orange, mandarine, pamplemousse, citron) ont des débouchés, et parmi les BOIS, privilégier des espèces bien valorisables, adaptées aux conditions environnementales.

IV.5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les SAF dominicains diffèrent par la diversité des espèces qui les composent et des densités de plantation de chacune d'entre elles. Les systèmes les plus prometteurs sont ceux les plus densifiés et les plus diversifiés : ils apportent un revenu identique aux systèmes moins diversifiés et moins denses via la vente de cacao et de produits associés mais permettent d'alimenter la famille du producteur. Ces SAF assurent donc une bonne provision de services environnementaux grâce à leur richesse floristique et permette d'améliorer la sécurité alimentaire des ménages.

De plus, ce travail apporte de nouvelles connaissances sur le fonctionnement des SAF et des différentes productions agricoles qui peuvent en découler. Uniquement à partir des résultats de cette étude et de leur imbrication les uns par rapport aux autres, nous pourrions élaborer des SAF innovants, qui devraient permettre aux producteurs d'obtenir une meilleure rémunération. Cela-dit, de nombreuses questions restent en suspens comme la disposition spatiale des cultures les unes par rapport aux autres, ou encore le choix du matériel végétal à sélectionner pour éviter une part de plantes non productive trop élevée. Une approche de conception participative pourrait faciliter l'émergence de solutions pour répondre à ces questionnements.

CHAPITRE V. CONCEPTION ASSISTEE PAR UNE ANALYSE STATISTIQUE ET COMPARAISON DE DEUX PROTOTYPES ISSUS DE CETTE METHODE AVEC LES QUATRE PROTOTYPES CO-CONÇUS

V.1. INTRODUCTION

La biodiversité cultivée peut-être à l'origine d'effets de facilitation ou de compétition ayant des impacts sur (i) le rendement et sa qualité, (ii) le cycle hydrologique, (iii) les bioagresseurs, (iv) la fertilité des sols (Beer, 1987). Ces impacts peuvent varier en fonction de la distance entre individus. En effet, plus deux individus sont proches, plus leurs racines ou leurs branches risquent d'occuper un même espace, et alors entrer en compétition pour les ressources qui s'y trouvent (eau, micro et macro-nutriments, lumière). Ces interactions peuvent créer des conditions locales, microclimatiques par exemple, qui affectent le comportement des communautés de ravageurs, d'agents pathogènes et de leurs antagonistes.

Cet effet de compétition lié à la distance a été démontré dans des systèmes agroforestiers tempérés avec des rangées d'arbres (noyer ou chêne) et avec une culture de maïs dans l'inter-rang. En plaçant dans le sol des barrières physiques à la frontière entre le linéaire arboré et l'allée de culture de maïs, les plants de maïs situés dans cette zone de bordure fournissent des rendements équivalents aux plants situés en milieu d'allée, alors qu'ils sont bien moindres en absence de barrière (Gillespie *et al.*, 2000). Cela suggère que des phénomènes de compétition ont lieu pour le prélèvement des nutriments du sol entre les arbres et la culture de maïs. Une étude similaire a démontré que certes les rendements étaient meilleurs en présence d'une barrière physique dans le sol entre les racines des arbres et la culture de maïs, mais tout de même plus faibles que comparés aux rendement en maïs du centre de l'allée (Miller and Pallardy, 2001). Ces résultats suggèrent qu'il existe par ailleurs une compétition pour la ressource lumineuse, les plants de maïs en bordure d'allée, donc sous les arbres, interceptant moins de lumière.

Il peut également se produire des interactions positives au sein d'une association culturale. On peut observer des effets de facilitation, par exemple quand une légumineuse est introduite dans l'association culturale et que sa fixation symbiotique d'azote bénéficie aux autres composantes de l'association (Dupraz *et al.*, 1998 ; Duchene *et al.*, 2017). Il peut également y avoir complémentarité quand chaque composante accède aux ressources sur un créneau spatial ou temporel particulier, évitant ainsi la compétition. Ces interactions positives sont quantifiées par une productivité globale de l'association (land equivalent ratio) supérieure à un (Talbot, 2011).

Les analyses statistiques du Chapitre IV mettent en évidence qu'il y a également dans les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers (SAF) des phénomènes de facilitation ou de compétition, qui se traduisent par la réduction ou l'augmentation du rendement par cacaoyer en fonction des espèces cultivées adjacentes et de leur distance.

L'agriculture est un domaine en perpétuelle transformation. Elle nourrit les hommes mais permet aussi de fournir de nombreux autres services écosystémiques que ceux de provision de nourriture (cf. résultats du MEA 2005). Pour que les systèmes agricoles gagnent en durabilité, il faut continuellement trouver des innovations techniques, sociales, organisationnelles à intégrer au fonctionnement de ces systèmes. L'émergence de ces innovations prend des formes variées comme expliqué dans l'introduction de la thèse : la réflexion et les propositions de différents acteurs, à différentes échelles, suivant différentes méthodes, permettent d'aboutir à des innovations. Dans notre cas, la conception

participative de quatre prototypes de SAF a été réalisée fin 2017 suivant une méthode et avec des résultats présentés dans le Chapitre III. Mais la conception d'innovations peut aussi s'appuyer sur des modèles mathématiques et des analyses statistiques basés sur des observations en parcelle. Dans ce dernier chapitre, nous nous proposons dans un premier temps de décrire une méthode de conception basée sur des analyses statistiques centrées sur la production en cacao dans des parcelles de producteurs. L'approche décrite dans cette partie cherche (1) à déterminer statistiquement les effets de différents groupes d'espèces (GE) sur la production des cacaoyers, en fonction de leur distance aux cacaoyers et (2) à en tirer des règles d'assemblage d'espèces pour la conception de deux prototypes de SAF. Enfin nous comparerons cette approche à la méthode de co-conception utilisée précédemment et discuterons les similarités et différences entre les prototypes issus des deux méthodes. Est-ce que les connaissances expertes de producteurs et de techniciens sont si éloignées des connaissances fournies par la recherche ? Une conception participative fournit-elle des innovations très différentes que celles qui découlent d'approches statistiques de fonctionnement de SAF ? C'est à ces questions que nous essaierons de répondre. Nous faisons l'hypothèse que les agriculteurs et techniciens, par leur observation quotidienne des effets des techniques de gestion appliquées dans les SAF, ont des connaissances expertes sur leur fonctionnement, qui peuvent être complémentaires des connaissances scientifiques.

V.2. MATERIEL ET METHODE

La méthode de conception à partir d'analyses statistiques portant sur le rendement en cacao est en elle-même un résultat décrit dans la prochaine section suivant trois étapes chronologiques : (1) le choix de la densité et de la disposition spatiale des cacaoyers, (2) la fixation de la densité des plantes associées, particulièrement des arbres, (3) la sélection de l'arrangement spatial de ces plantes associées. Ces différentes étapes de conception et les choix effectués sont ensuite comparés avec la méthode et les résultats de co-conception du Chapitre III. Pour faciliter la compréhension du raisonnement et de la comparaison des résultats (= prototypes) de l'application des deux méthodes de conception, le rappel de certaines abréviations est peut-être nécessaire :

- Les trois strates de culture : la strate basse avec les plantes non ligneuses (PNL), la strate intermédiaire avec les cacaoyers (CACAO), et la strate haute avec les arbres associés (AA)
- les différents groupes d'espèces cultivées (GE) : fixateurs d'azote *Fabaceae* (FIXN), les arbres à bois d'œuvre (BOIS), les agrumes (CITRUS), les autres arbres fruitiers (FRUIT), les bananiers ou *Musaceae* (MUSA), les autres cultures vivrières (VIV)
- les indicateurs économiques : cocoa income (CI), other products income (OPI), value of domestic consumption (VDC), economic value of other products (VOP = OPI + VDC), global income (GI = CI + OPI + VDC)
- les prototypes : des producteurs de la province de San Cristobal (PSC), des producteurs de la province de Duarte (PD), des techniciens de la province de San Cristobal (TSC), des techniciens de la province de Duarte (TD) et les deux nouveaux présentés dans ce chapitre V (P1ch4 et P2ch4).

V.3. RESULTATS

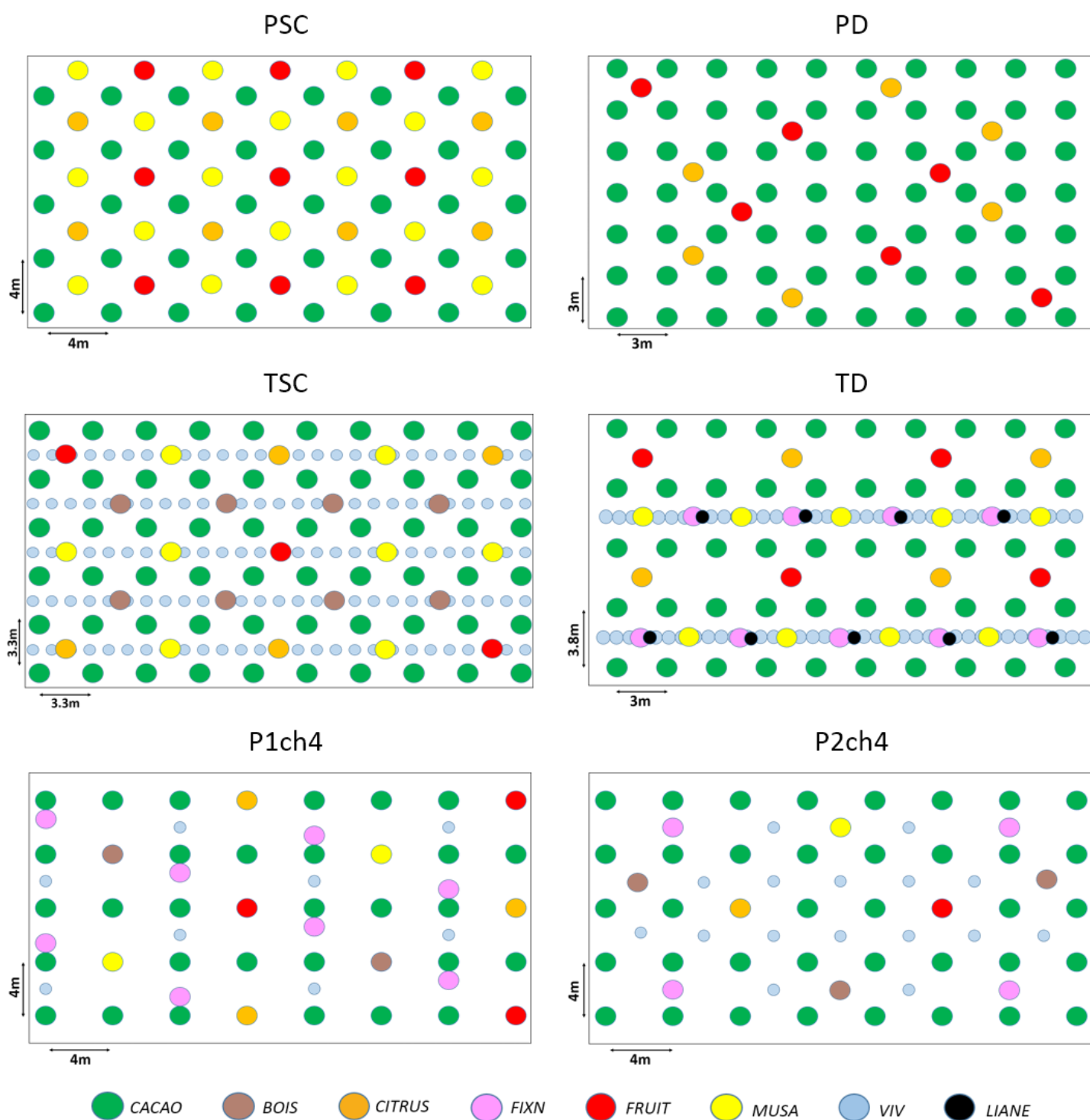


Figure 36. Schémas de dispositifs de plantation sur 1/16ème d'ha pour les prototypes matures co-conçus (PSC, TSC, PD et TD) et élaborés à partir des analyses statistiques du Chapitre IV (P1ch4 et P2ch4). Le code couleur correspond aux groupes d'espèces constitués dans le Chapitre IV (excepté le groupe des lianes introduites par le groupe TD).

V.3.1. Le cheminement de conception à partir des résultats de l'analyse statistique

Le raisonnement permettant d'aboutir à la conception de nouveaux prototypes, résumé par la Figure 38, provient de l'analyse des Figures 31, 32 et 35 du Chapitre IV. Il est centré sur la productivité des cacaoyers et l'effet positif ou négatif des espèces associées, suivant leur groupe d'appartenance, en fonction de leur distance d'éloignement comprise entre un et cinq mètres (Figure 37). Pour définir la distance minimale à respecter, un seuil d'effet sur la productivité du cacaoyer de -10% au minimum a été respecté. Les effets plus négatifs, sans savoir si l'effet des différents groupes d'espèces est cumulatif ou non, ont été considérés comme réduisant trop fortement la productivité des cacaoyers et les distances d'éloignement correspondantes ont donc été rejetées.

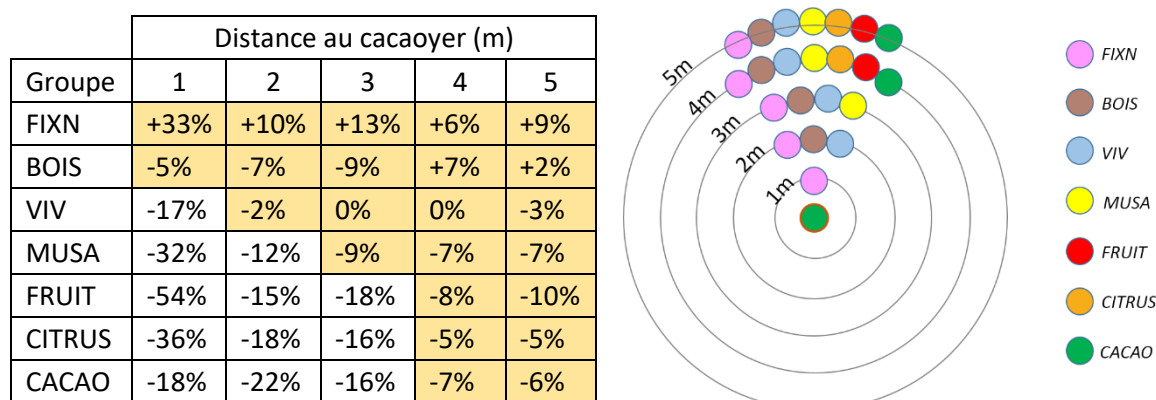


Figure 37. Tableau récapitulatif des effets de chacun des sept groupes d'espèces cultivées sur la productivité du cacaoyer (à gauche) et transcription de la règle de décision des distances entre le cacaoyer et les groupes d'espèces en schéma (à droite). Les cases orangées du Tableau signifient que l'effet est supérieur à -10% sur la productivité du cacaoyer, seuil qui nous donne la distance minimale à respecter entre le groupe d'espèces et le cacaoyer. Le schéma traduit cette règle de distance par rapport au cacaoyer central (cacaoyer avec le cercle rouge).

V.3.1.a. Densité et répartition spatiale des cacaoyers

La conception des prototypes considère dans un premier temps la place prise par le cacaoyer, que les producteurs souhaitent maintenir comme culture de rente principale dans leurs SAF. Plantés à des distances inférieures ou égales à 3m, les cacaoyers provoquent entre eux des effets de compétition affaiblissant leur productivité de 16 à 23%, ce qui est relativement important. A partir de 4m de distance, cette compétition est quasiment nulle (chapitre IV). C'est pourquoi la distance entre cacaoyers retenue est de 4m par 4m.

V.3.1.b. Densité des espèces associées

Dans un second temps vient la question de la densité accordée aux arbres associés (AA), qui est à l'origine d'un léger compromis entre la production des arbres associés et le rendement en cacao (cf. graphique B de la Figure 31 du Chapitre IV). Les résultats du Chapitre IV à l'échelle parcellaire (concordantes avec ceux du Chapitre II) montrent que les meilleurs GI (Global Income) sont atteints pour des densités d'arbres associés (dAA) comprises entre 128 et 282 arbres.ha⁻¹. Afin d'explorer cette gamme de densités, nous considérons deux prototypes contrastés, l'un, P1ch4, faisant plus de place que le second, P2ch4, aux arbres associés avec 256 contre 144 arbres.ha⁻¹. La densité de plantes non ligneuses (dPNL) n'influençant pas le rendement en cacao (cf. graphique C de la Figure 31 du Chapitre IV), on peut associer les PNL sans se soucier de leur densité de plantation.

V.3.1.c. Répartition spatiale des espèces associées

Vient ensuite la répartition de cette densité d'arbres associés parmi les autres groupes d'espèces que les cacaoyers (BOIS, CITRUS, FIXN, FRUIT, MUSA, VIV). D'après les résultats des modèles linéaires généralisés mixtes utilisés dans le chapitre IV, les *Fabaceae* (FIXN) sont les seuls à avoir un effet positif sur la productivité du cacaoyer à courte distance (<3m). Dans ce rayon, les arbres à bois d'œuvre (BOIS) ont un effet très légèrement négatif de -7% en moyenne sur la productivité des cacaoyers. Par ailleurs, à partir de 2 m de distance du cacaoyer, les cultures vivrières (VIV) n'ont plus d'impact négatif ou presque sur sa productivité. C'est pourquoi les individus appartenant à ces groupes d'espèces peuvent être implantés entre deux cacaoyers à des distances relativement proches. Pour P1ch4 : (i) les FIXN sont implantés à 1,5m du cacaoyer le plus proche et (ii) les VIV à 2m des deux cacaoyers les plus proches (Figure 36). Pour P2ch4 : (i) les FIXN se trouvent à 2m des deux plus proches cacaoyers, (ii) les BOIS et MUSA sont plantés au centre de quadrat de cacaoyers (soit à 2.8m de distance), (iii) les VIV sont situés au centre de quadrat d'arbres, cacaoyers seuls ou mélangés avec d'autres ligneux (soit à 2.8m de distance).

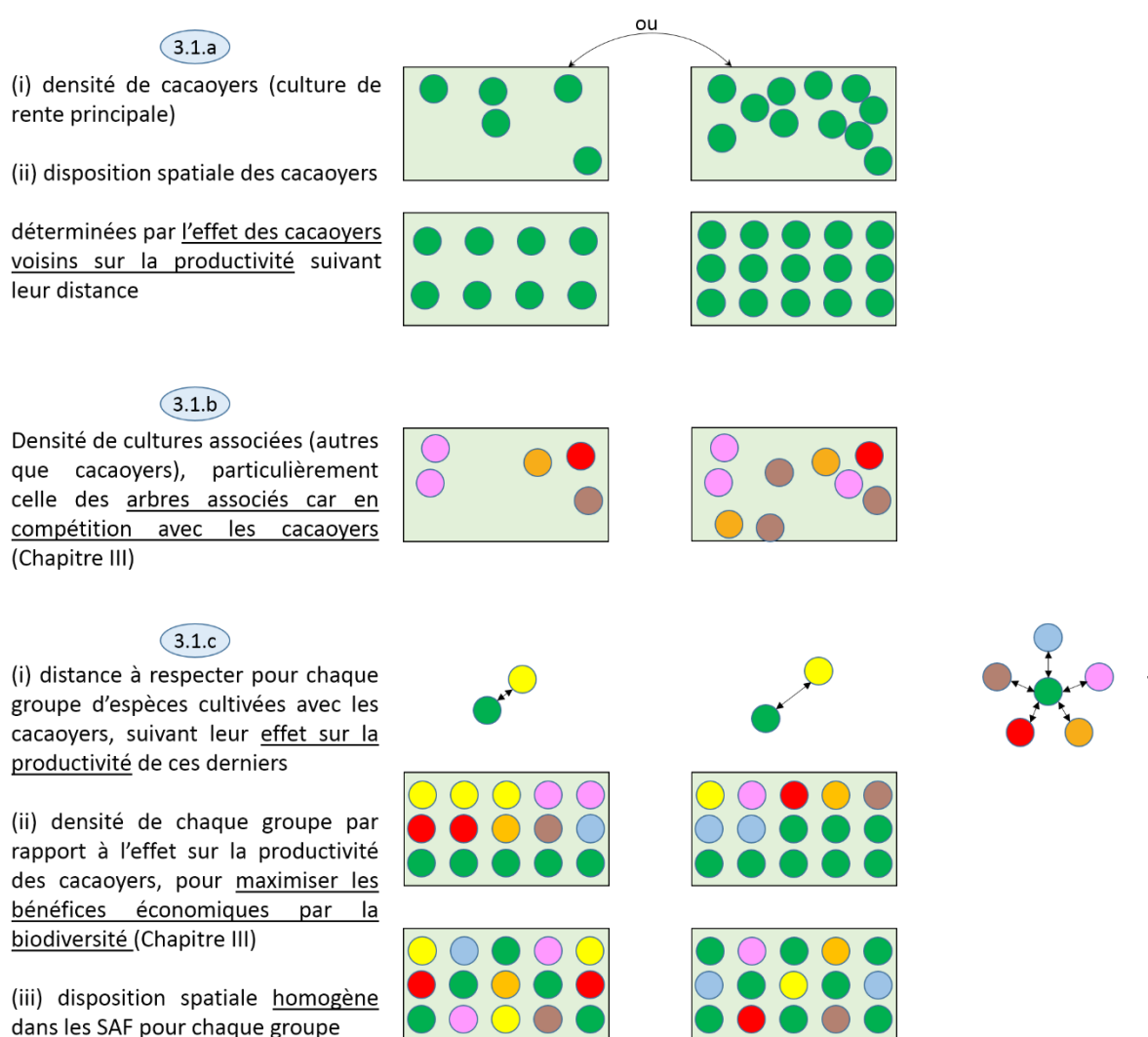


Figure 38. Schéma explicatif du raisonnement de conception à partir de résultats d'analyses statistiques suivant la chronologie des étapes décrites dans la partie 3.1 (a,b, c). Chaque cercle représente un groupe de culture associée, le code couleur étant identique à celui de la Figure 37.

Concernant les groupes aux effets particulièrement négatifs sur la productivité des cacaoyers à une distance inférieure à 3m, c'est-à-dire les agrumes (CITRUS), les autres fruitiers ligneux (FRUIT) et dans une moindre mesure les *Musaceae* (MUSA), l'intensité de leur effet est dégressive quand la distance aux cacaoyers augmente. Tout comme les cacaoyers eux-mêmes (CACAO), l'effet de ces trois groupes est négligeable à partir de 4m de distance. C'est pourquoi ils sont insérés dans les rangs de cacaoyers en remplacement de cacaoyers, de façon homogène dans l'espace afin de fournir un ombrage régulier aux cacaoyers (excepté les Musacées). Ne sachant pas où se situe l'intérêt économique entre cultiver des espèces des groupes CITRUS, FRUIT et MUSA par rapport aux cacaoyers, le premier prototype fera plus de place aux cultures associées tandis que le second sera plus axé sur les cacaoyers. Ainsi, le prototype P1ch4 offre une densité en cacaoyers faible de 480 cacaoyers.ha⁻¹ alors qu'elle est de 608 cacaoyers.ha⁻¹ pour P2ch4 (Tableau 22). Pour P1ch4, après 3 cacaoyers est inséré une plante associée sur chaque rang de cacaoyers, tandis que c'est le cas pour seulement un rang de cacaoyer sur trois pour P2ch4.

Tableau 22. Comparaison des moyennes de densité des espèces cultivées par hectare et par strate, du nombre de groupe d'espèces (GE) et de la richesse spécifique (S) observés dans les SAF existants (décrits dans les ChI et ChIII), dans les quatre prototypes co-conçus (PSC, PD, TSC et TD), et dans les deux prototypes dont la conception est issue de l'analyse statistique (P1ch4 et P2ch4). Pour les systèmes agroforestiers actuels, l'écart-type est donné après la moyenne.

SAF	dCACAO	dAA	dPNL	GE	S
SAF actuel (Ch1)	781 ± 239	114 ± 111	90 ± 77	-	5.4 ± 2,8
SAF actuel (Ch3)	860 ± 102	160 ± 65	201 ± 123	6 ± 0,5	10.1 ± 4,7
PSC	640	272	Jusqu'à 320	4	7
PD	1120	192	Jusqu'à 160	3	5
TSC	896	240	Jusqu'à 328	6	8
TD	960	288	Jusqu'à 2000	7	8
P1ch4	480	256	Jusqu'à 160	7	-
P2ch4	608	144	Jusqu'à 272	7	-

V.3.2. Comparaison de la structure des prototypes entre les deux approches de conception et de leur répercussion sur la productivité des cacaoyers

La densité de cacaoyers (dCACAO) est plus élevée pour P2ch4 que pour P1ch4, avec respectivement 608 et 480 cacaoyers.ha⁻¹. Mais dans les deux cas, elle est beaucoup plus faible que pour les prototypes co-conçus, excepté PSC avec 640 cacaoyers.ha⁻¹. Par ailleurs, elle est légèrement plus faible que celle observée dans les SAF actuels. En ce qui concerne la densité des arbres associés (dAA), elle est plus forte pour P1ch4 que pour P2ch4, avec 256 arbres.ha⁻¹ contre 144 arbres.ha⁻¹. Cette densité est relativement semblable à celle observée dans les prototypes co-conçus, à l'exception du prototype PD pour lequel la dAA est proche de celle de P2ch4.

Au niveau global de densité de plantes ligneuses (cacaoyers compris), les prototypes conçus à partir des analyses statistiques atteignent des niveaux bien plus faibles que les prototypes co-conçus. On comptabilise 736 plantes ligneuses par hectare pour P1ch4 et 752 plantes ligneuses par hectare pour P2ch4, alors que les prototypes co-conçus comprennent entre 912 (PSC) et 1312 (PD) plantes ligneuses par hectare (Tableau 22). Des effets de compétition importants devraient donc être observés entre les cultures associées dans les prototypes co-conçus. Malgré le fait que les plantes ligneuses associées et les Musacées se retrouvent toujours au centre de quadrats dans ces prototypes co-conçus, leurs distances avec les cacaoyers sont généralement trop courtes (Figure 39). D'après les résultats du GLMM, les plantes associées sont toutes trop proches des cacaoyers dans le prototype PD. Les cultures

vivrières VIV des prototypes TD et TSC ne devraient pas porter préjudice à la productivité des cacaoyers. Enfin, selon nos analyses statistiques, la seule culture ligneuse qui pourrait ne pas diminuer le rendement des cacaoyers serait le groupe BOIS dans le prototype TSC.

Tous les groupes d'espèces (GE) identifiés dans le Chapitre IV prennent place dans les prototypes P1ch4 et P2ch4 car d'après les résultats menés à l'échelle parcelle, les SAF les plus biodiversifiés sont ceux qui sont le mieux valorisés économiquement. Ils sont donc plus riches que les prototypes co-conçus, particulièrement ceux des producteurs PSC et PD (Tableau 22).

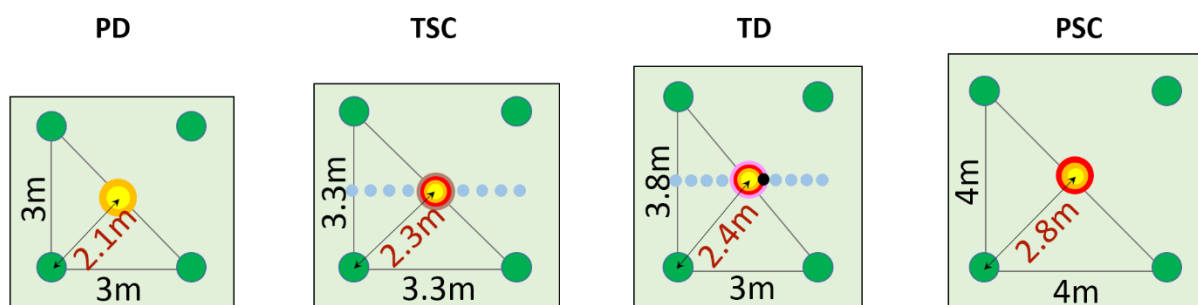


Figure 39. Motifs de disposition spatiale récurrente parmi les quatre prototypes co-conçus, avec au centre des quadrats de cacaoyers (en vert) des groupes d'espèces MUSA, CITRUS, FRUIT, BOIS et FIXN. Les groupes d'espèces associés pour chacun des prototypes ont été superposés. Pour PD : MUSA et CITRUS ; pour TSC : MUSA, CITRUS, FRUIT et BOIS ; pour TD : MUSA, CITRUS, FRUIT, FIXN et LIANE ; pour PSC : MUSA, CITRUS et FRUIT. Les cultures vivrières VIV (en bleu) sont présentes pour les prototypes TSC et TD au centre de l'inter-rang. Les distances en noir indiquent les distances entre cacaoyers, celles de couleur rouge-brique indiquent la distance entre chaque cacaoyer et la plante associée au centre du quadrat.

V.4. DISCUSSION : DES DIFFERENCES STRUCTURELLES POUVANT IMPACTER LES PERFORMANCES AGROECONOMIQUES

V.4.1. Faut-il privilégier une densification ou un éclaircissage ?

Bien que les résultats à l'échelle parcelle du Chapitre IV montrent que les SAF les plus denses (cacaoyers et AA confondus) sont ceux offrant les meilleures performances agroéconomiques, la solution ne se trouve peut-être pas dans la densification. En effet, tous les cacaoyers ont été pris en compte dans cette analyse du Chapitre IV, dont les plus jeunes de moins de 3 ans (et donc peu compétitifs), qui étaient plus présents dans les SAF avec des densités d'arbres associés élevées. Il s'agit plutôt d'un équilibre relatif à trouver entre une densité de cacaoyers et une densité d'arbres associés, tout en respectant certaines distances entre espèces suivant leur degré de compétitivité. Si le choix est plutôt de diversifier les productions en maintenant des niveaux de rendement en cacao intéressant le seuil supérieur de densité d'arbres associés est d'environ 300 arbres.ha⁻¹ (Chapitre IV). A l'opposé, si le producteur choisit de privilégier la production de cacao, le seuil inférieur est d'environ 100 arbres.ha⁻¹ (résultats similaires entre Chapitre II et IV).

Nous observons par ailleurs que plus les cacaoyers prennent de l'âge, plus il semble pertinent d'éliminer des arbres associés pour augmenter le GI (Figure 40). Pour cela, nous avons classifié nos 34 placettes suivant trois classes d'âge des cacaoyers (C) : (i) jeune lorsqu'ils avaient moins de 20 ans en moyenne, (ii) mature lorsqu'ils avaient entre 20 et 30 ans et (iii) vieux lorsqu'ils avaient plus de 30 ans. Nous les avons aussi classifié suivant trois classes de densité d'arbres associés (dAA) : (i) faible lorsque dAA était inférieure à 110 arbres.ha⁻¹, (ii) intermédiaire lorsque dAA était comprise entre 110 et 170 arbres.ha⁻¹ et (iii) élevée lorsque dAA était supérieure à 170 arbres.ha⁻¹. Nous avons croisés ces deux croisements et observés les GI de chaque classe combinée.

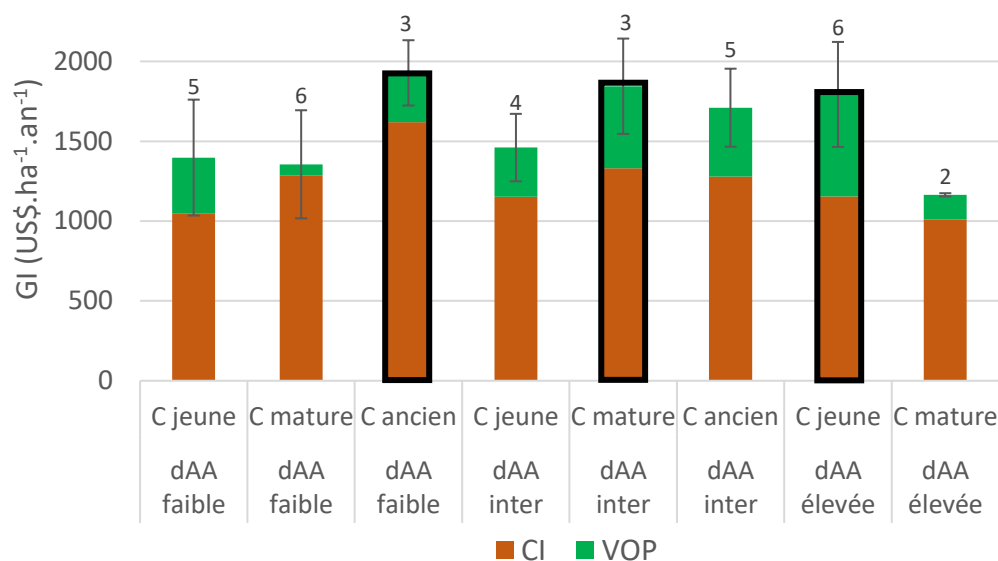


Figure 40. GI (Global Income) avec dissociation du CI (Cocoa Income) et du VOP (economic Value of Other Products) en fonction d'une classification combinant classes d'âge des cacaoyer (C jeune, C mature, C ancien) et densités des arbres associés (dAA faible, dAA intermédiaire, dAA élevée). Au-dessus des barres d'erreur l'étiquette de données nous indique le nombre de dispositifs composant la classe. Les barres des trois meilleurs GI sont cernées de noir.

Si l'on raisonne en terme de part relative de la surface terrière (St) des cacaoyers, nous pouvons mettre en évidence cette relation entre âge des cacaoyers et diminution de la St occupée par les arbres associés. La productivité des cacaoyers jeunes serait favorisée par des arbres associés occupant au moins la moitié de la St totale du SAF, alors qu'en vieillissant il lui serait bénéfique d'occuper une part plus importante de la St totale (Figure 41). Plus les cacaoyers sont âgés et vigoureux, plus leur système racinaire et leur frondaison occupent d'espace, plus leur surface de bois où apparaissent les coussins floraux, et donc les cabosses, est importante. Il devient alors moins pertinent, par rapport à un objectif de production de cacao, d'avoir une forte dAA, car les arbres entrent alors en compétition pour les ressources, même si le maintien d'arbres associés reste utile aux cacaoyers ombrophiles. Ces résultats diffèrent de ceux délivrés par Saj and Jagoret (2017) qui affirment que dans les vieilles cacaoyères (jusqu'à cent ans), la St du peuplement cacao par rapport au total ne doit pas excéder 40% pour obtenir des bons rendements.

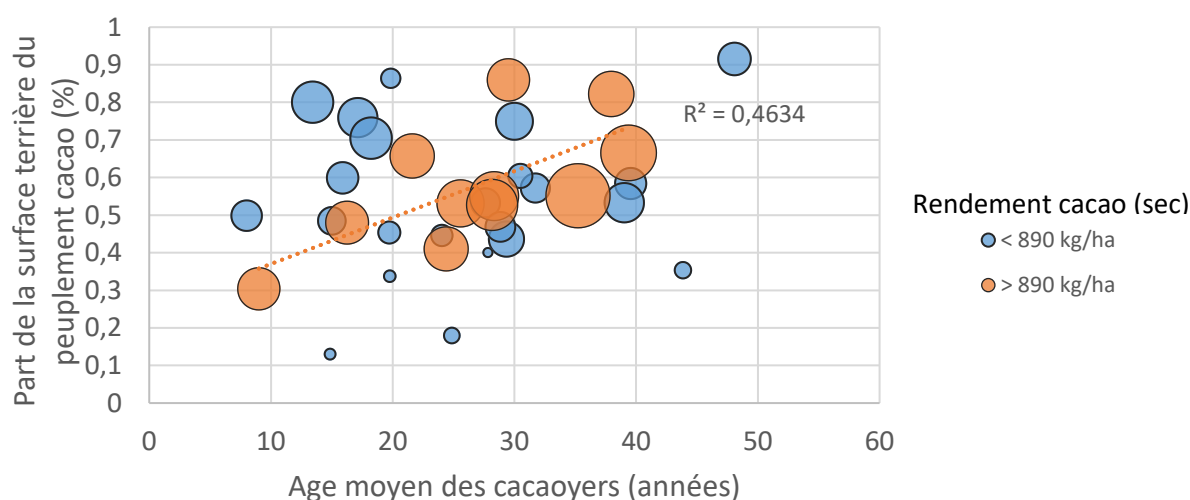


Figure 41. Relations entre la part de la surface terrière du peuplement cacao et l'âge moyen des cacaoyers en fonction du rendement cacao sur nos 34 dispositifs étudiés. Le diamètre des bulles est proportionnel au rendement cacao. Le tiers des plus hauts rendements cacao (>890 kg/ha) mesurés dans les 34 dispositifs apparaissent en orangée.

V.4.2. Des dispositions de cultures associées plus risquées pour les prototypes co-conçus

En ne tenant compte que de la densité des cacaoyers et pas des autres cultures associées, celle-ci est élevée dans les prototypes co-conçus, à l'exception du prototype PSC. Par conséquent dans ce dernier cas, il ne devrait pas y avoir d'effet négatif sur la productivité des cacaoyers qui devraient atteindre leur potentiel, et donc le CI (cocoa income) devrait être élevé. En revanche, en tenant compte des cultures associées, le CI risque de diminuer pour les quatre prototypes co-conçus à cause de l'arrangement spatial choisi, c'est-à-dire avec les cultures associées au centre de quadrats de cacaoyers, sauf pour les VIV. Les GE les plus compétitifs avec les cacaoyers (FRUIT et CITRUS) se retrouvent dans chaque prototype à des distances comprises entre 2,1m et 2,8m, bien en-deçà des 4m, distance à laquelle il faudrait les séparer des cacaoyers d'après les résultats du GLMM du Chapitre IV. Il y aura dans tous les prototypes co-conçus des effets de compétition ayant pour conséquence une productivité moindre des cacaoyers à cause d'une proximité à moins de 4m (i) d'autres cacaoyers (sauf pour le prototype PSC) et (ii) de cultures associées fruitières (FRUIT, CITRUS et MUSA). Certes, dans les premières années des prototypes, aucun phénomène de compétition entre plantes ne devrait être significatif, les plantes étant trop jeunes et pas assez développées. Mais une fois les plantes ligneuses à un stade de développement végétatif « de maturité », il est fort probable que les effets de compétition se fassent ressentir au niveau du rendement en cacao. Par ailleurs, d'après nos analyses statistiques, les arbres à bois d'œuvre (BOIS) sont à une distance suffisante dans le prototype TSC pour éviter l'effet de réduction de rendement en cacao. Cependant, il est probable que leur exploitation soit rendue délicate voire irréalisable à cause d'inter-rangs assez étroits.

Limiter au maximum les effets de compétition, c'est ce que l'on s'est proposé de réaliser en élaborant les deux prototypes P1ch4 et P2ch4. C'est pour cette raison que les cultures associées les plus défavorables sur la productivité des cacaoyers à courte distance viennent s'intercaler dans le rang en remplacement d'un cacaoyer et ne sont pas placées au centre d'un quadrat de cacaoyers (Figure 36). D'autres prototypes auraient pu être proposés, comme par exemple un prototype constitué d'une répétition du motif de disposition spatiale suivant : deux rangs de cacaoyers pour un rang d'arbres associés compétitifs. Cet arrangement spatial des cultures faciliterait par ailleurs l'organisation du travail de récolte. Cependant, pour une répartition plus homogène de la biodiversité, utile pour la régulation de maladies ou de ravageurs, il est préférable de les insérer de façon régulière dans les rangs de cacaoyers (Gidoïn *et al.*, 2014a; Gidoïn *et al.*, 2014b). De plus, peut-être qu'entre ces différents groupes d'espèces cultivées les distances à respecter sont plus importantes que celles avec les cacaoyers. Un arrangement sur une ligne avec un espacement de 4 m uniquement entre individus des GE FRUIT, BOIS et CITRUS engendrerait à coup sûr des problèmes d'encombrement spatial, comme par exemple l'entrecroisement de leurs frondaisons.

V.4.3. Adaptation nécessaire de la méthode d'évaluation *ex ante* des performances agroéconomiques

En appliquant la méthode d'évaluation *ex ante* utilisée au Chapitre III, les prototypes issus des analyses statistiques auraient des performances agroéconomiques bien moins bonnes que les prototypes co-conçus. Il faudrait pouvoir y intégrer un effet de compétition ayant pour conséquence la diminution du rendement de cacao (et d'autres produits) si deux plantes compétitives sont trop proches dans l'espace. Mais l'incertitude est très grande concernant l'ampleur de l'effet négatif ou positif sur la productivité du cacaoyer (ou d'une autre plante) : comment quantifier l'effet qu'ont plusieurs plantes dans un périmètre donné ? Est-ce que l'effet est additif ou bien constant ? Par exemple, lorsqu'un fruitier est à 3 m de distance d'un cacaoyer, la productivité de celui-ci devrait diminuer de 18% (cf. tableau de la Figure 37). Mais qu'en est-il si deux fruitiers sont présents à une distance de 3m du cacaoyer, est-ce que la baisse de productivité mesurée sera de 18% ou de 36%, ou bien d'une valeur intermédiaire ? Si l'effet des groupes d'espèces (GE) sur la productivité des cacaoyers n'est pas additif,

alors on pourrait observer des bons CI pour les prototypes co-conçus, peut-être même meilleurs que les prototypes issus d'analyse statistique.

V.5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le point commun des deux approches de conception est une biodiversité cultivée répartie de façon homogène dans l'espace, permettant de favoriser des services écosystémiques liés au bon fonctionnement des SAF. En revanche, l'approche par analyse statistique indique que les participants au processus de conception participative ont été optimistes sur les densités de cultures ligneuses associées, impliquant par conséquent des distances courtes entre individus. Et cette remarque est renforcée par les motifs de plantation sélectionnés avec des cultures associées entre les rangs de cacaoyers, plus précisément au centre de quadrats de cacaoyers, bien que l'espace de l'inter-rang varie entre 3 et 4 m parmi les quatre prototypes co-conçus. Toutefois, de par leur expérience, les producteurs savent aussi gérer l'évolution de leur SAF dans le temps et dans l'espace (Jagoret *et al.*, 2017b). Ils éclairent alors quand la densité de plantation est trop importante et que certains cacaoyers sont improductifs.

Pour affiner ce travail de conception assistée par analyse statistique, d'autres modèles GLMM auraient pu être développés, comme par exemple calculer des distances à privilégier pour la productivité d'autres cultures que les cacaoyers (FRUIT, MUSA, CITRUS, VIV), ou encore un modèle semblable mais dont les groupes d'espèces seraient remplacés par des classes de strates de hauteur de la végétation.

Le choix des espèces précises à associer, et non pas seulement de groupes d'espèces, pourrait se faire via une approche participative. Mais cette fois-ci en essayant d'élargir les possibilités d'innovations disruptives en associant au processus de sélection des industriels de transformations de produits agricoles dont les espèces végétales ne sont pas présentes à ce jour dans les SAF, mais qui pourrait tout à fait y avoir leur place (Meynard *et al.*, 2017). L'enjeu serait de sélectionner des plantes qui soient productives dans cet environnement et dont les produits soient facilement commercialisables et rentables.

Par ailleurs, les prototypes co-conçus, qui ont été installés entre l'été 2018 et le premier trimestre 2019, seront suivis scientifiquement au cours des prochaines années. Les effets de certains groupes d'espèces sur le rendement en cacao seront donc à nouveau mesurés et le modèle pourra alors être réajusté.

CHAPITRE VI. DISCUSSION GENERALE

VI.1. QUID DE LA PROVISION DE SERVICES ECOSYSTEMIQUES PAR LES SAF COMPLEXES ETUDIES ?

Les prototypes issus des deux approches de conception fournissent des services écosystémiques, notamment de support et de régulation, qui n'ont pas été quantifiés dans la thèse. Bien qu'ils se composent d'une certaine diversité d'espèces et de variétés associées, qui *a priori* devrait offrir une productivité élevée et donc un service d'approvisionnement fort, peut-on dire que cette diversité est suffisante pour fournir d'autres services en quantité suffisante ? Et n'y a-t-il pas d'autres aspects à prendre en compte que la biodiversité pour la réalisation de ces services ?

D'après la littérature existante, la biodiversité cultivée élevée des SAF complexes permet la fourniture de nombreux services (Cerdeira, 2017), à partir d'au moins cinq espèces associées différentes (Zanetti, 2019). Pour d'autres auteurs, même des SAF tempérés bien moins diversifiés sont capables d'augmenter la fourniture de services (Davis 2012), particulièrement en ce qui concerne le contrôle de l'érosion des sols et l'augmentation de leur fertilité (Torralba 2016). Par exemple, sur le long terme, l'association d'arbres fixateurs d'azote avec du maïs en Afrique du Sud montre des meilleurs rendements que des systèmes de culture monospécifiques de maïs (Sileshi and Mafongoya, 2006). Cela s'explique grâce à l'augmentation de la teneur en azote du sol, élément nutritif essentiel pour le développement du maïs. Dans l'hémisphère Nord, le blé dur subit une baisse significative de son rendement à cause de l'ombrage des arbres associés, mais le taux de protéines des grains de blé est plus élevé (Artru *et al.*, 2017). On observe certes une baisse de la quantité mais une amélioration de la qualité nutritionnelle du grain. Une autre étude, portant sur l'association entre noyers et luzerne (légumineuse) a montré une baisse de rendement de la luzerne en bordure d'allées de noyers, mais que, dans cette zone, la fixation d'azote était stimulée (Querné *et al.*, 2017), ce qui révèle un compromis entre un service environnemental et un service de production. Ces résultats nous aident d'une part à comprendre le fonctionnement des écosystèmes cultivés et d'autre part à faire des choix pour l'agriculture que nous souhaitons développer dans le futur.

VI.1.1. Liens entre structure des SAF et services de support

Les services de support sont les services liés aux ressources (eau, nutriments et lumière) nécessaires à la production primaire des plantes (MEA, 2005). Dans les SAF, un ombrage excessif des arbres associés favorise la croissance végétative mais pas la production de cabosses des cacaoyers (Beer *et al.*, 1998). Cet ombrage plus ou moins intense et recouvrant est déterminé par la couronne des arbres associés (Isaac *et al.*, 2007), caractérisée par certains traits morphologiques (LAI, SLA, surface de frondaison). Le recyclage des nutriments tout comme le recyclage de l'eau dépendent aussi de certains traits écologiques des espèces composant les SAF par rapport à leurs attributs racinaires et foliaires (Hartemink, 2005 ; Schwendenmann *et al.*, 2009), comme la composition chimique de la litière et des racines mortes et leur capacité à se décomposer. En effet, la disponibilité de certains nutriments comme l'azote et le potassium peut être améliorée si les espèces choisies fournissent des litières (feuilles ou racines mortes) riches en nutriments (Anim-Kwapong, 2003). Cette disponibilité des nutriments est certainement favorisée par la plus grande diversité biologique des sols observée sous les SAF (Rousseau *et al.*, 2012). La structure foliaire favorise l'infiltration de l'eau et transpire alors que le système racinaire prélève plus ou moins l'eau suivant les besoins des espèces végétales. L'eau transférée dans l'atmosphère alimentera de futures pluies tandis que l'eau infiltrée dans le sol approvisionnera les cultures et les nappes phréatiques. Ce recyclage de l'eau dépend aussi de la densité et de la répartition spatiale des espèces des SAF (Schwendenmann *et al.*, 2009).

VI.1.2. Liens entre structure des SAF et services de régulation

Les services de régulation comme définis par le MEA (2005) sont les services de régulation des bioagresseurs (ravageurs et maladies), du changement climatique, de l'érosion et de la pollinisation.

Dans les SAF, des densités modérées d'arbres d'ombrage pour éviter un microclimat trop humide sous la canopée et pour servir d'écran sont nécessaires pour que *Moniliophthora roreri*, le champignon responsable de la moniliose, ne puisse ni se développer ni se propager (Medeiros *et al.*, 2010). Aussi, une répartition non agrégée de ces arbres limite l'intensité de la moniliose sur les cabosses (Gidoïn *et al.*, 2014a). De plus, il est utile que les arbres d'ombrage soient de différentes hauteurs pour que se développent différents microclimats dans le SAF, favorisant ainsi la présence d'antagonistes naturels de *Moniliophthora perniciosa*, responsable du balai de sorcière (Loguercio *et al.*, 2009). Des études similaires ont été menées pour d'autres bioagresseurs (mirides, pourriture brune, thrip, swollen shot). La structure du couvert végétal, au travers des espèces végétales, de leur diversité, de leur densité et de leur agencement dans l'espace joue un rôle essentiel dans la régulation de ces bioagresseurs.

Les SAF sont des systèmes de culture ayant un rôle à jouer dans la mitigation du changement climatique : (i) en stockant du carbone dans le sol mais aussi directement dans la biomasse aérienne, dans le bois des arbres (Somarriba *et al.*, 2013; Schroth *et al.*, 2015; Nijmeijer *et al.*, 2019b), et (ii) en limitant le flux de CO₂ du sol vers l'atmosphère (Mutuo *et al.*, 2005; Gomes *et al.*, 2016). Par ailleurs, les attributs racinaires et foliaires jouent un rôle dans l'infiltration de l'eau dans le sol et par conséquent de la limitation de l'érosion du sol, comme l'ont montré des études sur des SAF à base de caféiers et d'hévéas (Meylan *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2019).

Enfin le service de régulation de la pollinisation dans les SAF, même si nous manquons encore d'informations à ce sujet (Schawe *et al.*, 2016), est amélioré lorsque la densité et la diversité des plantes cultivées associées est importante car elles peuvent héberger les insectes pollinisateurs (Córdoba *et al.*, 2013; Deheuvels *et al.*, 2017; Mortimer *et al.*, 2017b). Moins de 10% des fleurs de cacaoyers seraient pollinisées dans les SAF, indiquant qu'il s'agit là d'un facteur limitant le rendement en cacao (Groeneveld *et al.*, 2010). Ce résultat légitime l'intérêt de la pollinisation manuelle (Orozco-Aguilar and López Sampson, 2017), mais aussi le besoin d'approfondir les recherches pour déterminer quels sont les principaux insectes pollinisateurs et leurs hôtes potentiels.

VI.1.3. Les services écosystémiques dépendant des pratiques agricoles

Ainsi la diversité des espèces associées dans les SAF complexes impacte directement ou indirectement la fourniture de services écosystémiques. Les agriculteurs, qui gèrent leurs systèmes de culture et même modèlent leur structure en continu (Jagoret *et al.*, 2018), ont la possibilité de réguler positivement ou négativement la fourniture de services par (i) le choix des espèces cultivées associées, (ii) leur implantation dans le temps et dans l'espace et (iii) les pratiques de gestion de ces espèces (particulièrement via la taille, la fertilisation et la gestion des bioagresseurs). Ils ont des connaissances basées sur leur expérience du fonctionnement des SAF dont ils se servent pour améliorer la fourniture de services qui leur sont utiles, principalement des services de production pour générer des revenus et assurer leur alimentation (Anderman *et al.*, 2014 ; Jagoret *et al.*, 2014b ; Mbow *et al.*, 2014 ; Smith Dumont *et al.*, 2014 ; Graefe *et al.*, 2017 ; Rigal *et al.*, 2018). Pour que les SAF fournissent plus de services « environnementaux », il faudrait envisager la mise en place de subventions appelées paiements des services écosystémiques (PES) comme cela est pratiqué par exemple au Costa-Rica (Rapidel *et al.*, 2011). Mais la mise en œuvre de ce type de mesure agro-environnementale pose différentes questions : comment hiérarchiser les services ouvrant droit à un PES, comment quantifier les services rendus par le système de culture et les traduire en unité monétaire ? La question des interactions entre services (compromis ou synergie) et de l'impact des pratiques culturales est

complexe. Une exploration des stratégies de gestion, sur un échantillon de systèmes de culture, permet d'identifier des situations performantes pour plusieurs services via l'algorithme de Pareto, permettant ainsi d'identifier des pratiques agricoles pertinentes (Andreotti *et al.*, 2018). Mais il reste encore à concevoir la trajectoire technique qui conduit à l'espace de compromis entre services qui est recherché (Notaro *et al.*, 2015; Rapidel *et al.*, 2015).

Les différents prototypes de SAF conçus dans cette thèse, installés *de novo* ou bien en transition à partir de systèmes existants offriront un bon support pour une analyse couplée de la production agricole et de la fourniture de services environnementaux.

VI.2. DES STRUCTURES QUI AUGMENTENT LA PRODUCTIVITE GLOBALE DES SAF MAIS QU'EN EST-IL DE LA PROFITABILITE ECONOMIQUE ?

Les associations de culture des prototypes devraient *a priori* pouvoir bien se développer et fournir des produits commercialisables ou consommables, malgré certains effets de compétition pour les prototypes co-conçus. Un *land equivalent ratio* (LER) supérieur à un devrait alors être observé une fois les prototypes arrivés à maturité, comme cela a été démontré par de nombreuses études scientifiques sur les SAF (Mead and Willey, 1980 ; Graves *et al.*, 2010 ; Bai *et al.*, 2016 ; Chapagain *et al.*, 2018 ; Rahaman *et al.*, 2018 ; Seserman *et al.*, 2018). Cependant cette diversité de cultures associées va demander un nombre d'interventions plus élevé de la part des agriculteurs pour la gestion du SAF. Par exemple, une phénologie asynchrone entre deux espèces cultivées aura pour conséquence que même si les pratiques de gestion sont identiques (taille, fertilisation, récolte), elles seront décalées dans le temps. Aussi, chaque culture associée peut avoir ses spécificités : les cacaoyers et les musacées font des rejets que l'agriculteur va essayer d'éliminer régulièrement dans le premier cas, ou bien soit d'éliminer soit de sélectionner (œilletonnage) puis repiquer dans un emplacement adéquat ou laisser sur place en fonction des conditions de sol dans le second cas. Les pratiques de gestion à effectuer pour chaque espèce cultivée peuvent être chronophages et parfois même nécessiter de la main d'œuvre spécialisée. C'est par exemple le cas pour les arbres du genre *Artocarpus*, principalement le Fruit à pain et le Châtaigner pays, pour lesquels la récolte est réalisée par des professionnels sachant s'assurer pour grimper à l'arbre. C'est aussi le cas quand il est nécessaire de tailler de grands arbres fournissant un ombrage excessif aux cultures des strates inférieures.

En Bolivie, la monoculture de cacaoyers s'est avérée 41% plus productive en cacao que les SAF (Armengot *et al.*, 2016). Cependant, en tenant compte des produits associés, cette même étude a montré que la productivité du travail était multipliée par deux en agroforesterie par rapport au système monospécifique. Paul *et al.* (2017) ont démontré que l'agroforesterie peut être compétitive par rapport à une exploitation agricole aux activités agricoles « mosaïques », seulement si les espèces associées ont des interactions positives entre elles et qu'elles permettent des économies d'échelle, ce qui devrait être le cas des prototypes co-conçus. D'autres travaux ont aussi montré qu'il valait mieux pour l'économie des ménages agricoles et leur sécurité alimentaire favoriser un *land sharing* (ou agroforesterie) plutôt qu'un *land sparing* (spécialisation pour une ou quelques cultures séparées) (Tscharntke *et al.*, 2012 ; Cardozo *et al.*, 2015 ; Michler and Josephson, 2017). Mais ces résultats sont parfois controversés : Jezeer *et al.* (2017) affirment que cela est rentable à condition de ne posséder qu'une petite surface à cultiver.

Les performances économiques que nous avons évaluées dans nos travaux n'ont considéré que le chiffre d'affaire et la valeur économique de l'autoconsommation. Aucune charge opérationnelle liée à la gestion des SAF n'a été prise en compte, principalement représentée par la main d'œuvre, et dans une moindre mesure par les intrants. En effet, les outils sont simples et peu coûteux (scie, machette,

sécheur, seau entre autres) et les fertilisants organiques ne sont que peu utilisés ou bien directement produits sur l'exploitation agricole. Même si la surface totale de SAF par exploitation en République Dominicaine est faible (3,5 hectares en moyenne d'après notre étude), il est courant que les producteurs fassent appel à de la main d'œuvre extérieure pour gérer certaines opérations agricoles. Ce constat est renforcé par le fait que la population de producteurs est âgée (60 ans d'après nos enquêtes), et donc moins apte à effectuer certaines pratiques de gestion. La prise en compte des coûts de gestion des SAF et même de la gestion globale de l'exploitation agricole serait intéressante pour comprendre encore mieux leur fonctionnement en identifiant les objectifs et les contraintes.

VI.3. PERSPECTIVES DE LA PARTIE RECHERCHE DU PROJET CACAOFOREST

Comme cela a été rapidement précisé dans le Chapitre III, les prototypes co-conçus avec les agriculteurs et les techniciens vont être évalués dans un réseau de parcelles de producteurs ayant participé au processus de co-conception. Ce réseau de prototypes est résumé schématiquement sur la Figure 42. Dans chacune des deux provinces concernées (Chapitre III), deux prototypes ont été élaborés. Ces prototypes ont été installés ou sont en cours d'installation de deux manières, soit nouvellement installés sur des terrains en jachère, soit progressivement mis en place dans des SAF vieillissants. On parle alors respectivement de *prototypes de création* et de *prototypes de transition*. Ces deux modes d'implantation des prototypes co-conçus sont accompagnés de la mise en place de prototypes témoins. Avec les prototypes de création, le prototype témoin n'est autre que ce qui est parfois recommandé par les instituts techniques, la monoculture de cacaoyers, ou plein soleil (PS), avec un espacement de 3 m x 3 m entre individus. Pour chaque province, les variétés de cacaoyers qui composent ces prototypes sont un mélange des variétés choisies dans les prototypes du groupe de techniciens et de producteurs de la province. Avec les prototypes de transition, le témoin est un SAF représentatif de la province au niveau de sa structure et de sa gestion technique, appelé *Business as*

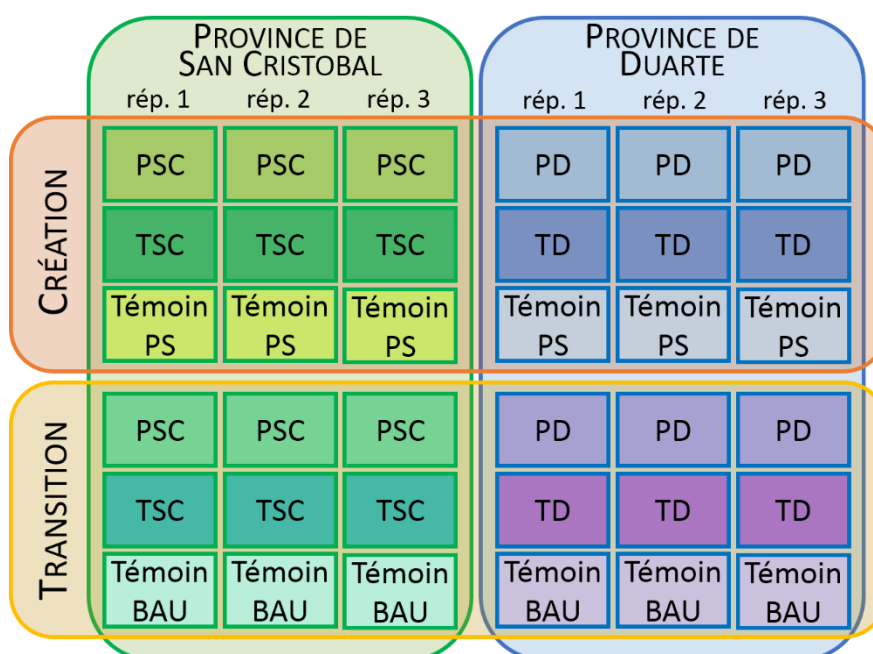


Figure 42. Schéma conceptuel du réseau expérimental de prototypes de SAF cacaoyers. Chaque prototype sera répliqué trois fois (rép. 1, 2, 3) pour les prototypes de création comme les prototypes de transition. Les témoins installés dans chaque zone sont (i) pour les prototypes nouvellement installés des témoins plein soleil (PS) et (ii) pour les prototypes de transition des témoins « Business as usual » (BAU) (d'après le guide technique et scientifique du réseau expérimental participatif du projet CacaoForest élaboré par O. Deheuvels et M. Notaro (2018)).

usual (BAU). Chaque prototype co-conçu et chaque témoin ont été répliqués trois fois pour pouvoir donner de la puissance aux analyses statistiques qui seront effectuées à partir des données récoltées lors du suivi scientifique du réseau. La mise en place des prototypes de création a été relativement simple, en fonction de l'âge de la jachère sur laquelle ils ont été installés, et donc du niveau de développement des plantes qui y ont prospéré. En revanche la mise en place des prototypes de transition est beaucoup plus complexe, car elle demande une gestion précise dans le temps et dans l'espace des cultures déjà en place et des cultures nouvelles. Les espèces et globalement leur arrangement spatial doivent d'ici deux ans correspondre aux prototypes tel que cela a été décidé lors des ateliers de conception. Dans les SAF vieillissants qui accueilleront ces prototypes, certains arbres seront conservés s'ils sont bien positionnés, c'est-à-dire comme dans la disposition spatiale convenue (à 0.5m près). Ils seront destinés à fournir des rejets qui seront alors greffés avec des greffons de variétés choisies lors du processus de co-conception. Cela implique que la grande majorité des cacaoyers et des arbres associés proviendront de pépinières de nos partenaires (IDIAF, Institut Dominicain de Recherche Agricole et Forestière). Les arbres associés et nombreux cacaoyers inutiles, parce qu'ils ne correspondent pas au prototype ou parce qu'ils sont mal localisés dans l'espace, seront éliminés de façon progressive afin de permettre aux jeunes cacaoyers d'avoir un ombrage optimal pour leur développement. Quelques photos d'installation de prototypes de création sont disponibles en Annexe 8.

Ce réseau expérimental est un formidable dispositif associant les agriculteurs, les coopératives auxquelles ils sont affiliés et la recherche scientifique. La continuité du travail collaboratif établi jusqu'à présent est nécessaire pour pouvoir approfondir l'étude des prototypes, et analyser si les hypothèses de départ sont vérifiées et les objectifs fixés atteints. Pour y parvenir il sera nécessaire de recueillir les données suivantes sur chaque prototype :

- Rendements des cacaoyers et des cultures associées, en produits vendus et consommés *a minima*, permettant de quantifier les services de production fournis. Si possible quantifier la récolte perdue à cause de bioagresseurs ou tout simplement laissée sur place par manque d'intérêt.
- Prix de vente des produits récoltés par unité de produit, permettant de calculer le chiffre d'affaire de la vente et aussi d'estimer économiquement l'autoconsommation du ménage.
- Charges opérationnelles correspondant aux coûts relatifs à la production, particulièrement le coût du travail (main d'œuvre) pour calculer des marges brutes.
- Temps de travaux des itinéraires techniques pour mesurer la productivité du travail.

Il faudra donc aller plus loin que les mesures effectuées dans le Chapitre IV, en incluant l'itinéraire technique dans l'analyse, dont le temps de travail et le coût des pratiques de gestion. Ce travail débouchera sur l'identification d'effets positifs et négatifs des décisions techniques prises lors des ateliers de conception. Ce processus de suivi et d'analyse des prototypes étant collaboratif, c'est-à-dire encadré et cogéré par les différentes parties prenantes, des modifications pourront être apportées aux prototypes. En effet, il s'agit d'un processus dynamique où les prototypes ne sont pas figés et dont la trajectoire pourra être amenée à évoluer par rapport aux décisions prises initialement en ateliers de co-conception. Un accompagnement particulier des producteurs pour la gestion des espèces inconnues ou dont la gestion est innovante, notamment le poivrier et son tuteur le Gliricide, ainsi que les arbres à bois d'œuvre, sera nécessaire pour leur apprentissage et l'avancement du projet.

Des mesures plus axées sur le fonctionnement agroécologique des prototypes seront à entreprendre, avec pour objet d'étude les services (i) de régulation : des bioagresseurs, des pollinisateurs, du changement climatique, de l'érosion, de la qualité de l'eau, et (ii) de support : recyclage de l'eau et des nutriments et disponibilité de la ressource lumineuse. Pour affiner l'analyse des effets de compétition

ou de facilitation entre les différentes cultures associées, la mesure d'indicateurs autres que la hauteur des plantes et leur surface terrière pourrait s'avérer pertinente. Les LAI (leaf area index) et SLA (specific leaf area), la production de litière et sa composition physico-chimique, la surface de frondaison etc., pourraient être mis en relation avec la productivité de plantes voisines, notamment celle des cacaoyers. Il s'avère que parmi les quatre prototypes co-conçus, un motif est récurrent : des quadrats de cacaoyers avec une plante associée en leur centre. L'analyse approfondie de l'effet des plantes voisines et de certains de leurs traits fonctionnels sur la productivité des cacaoyers serait puissante grâce à la répétition de ce motif et à la densité souvent élevée des espèces associées dans les prototypes (cf. Figure 43).

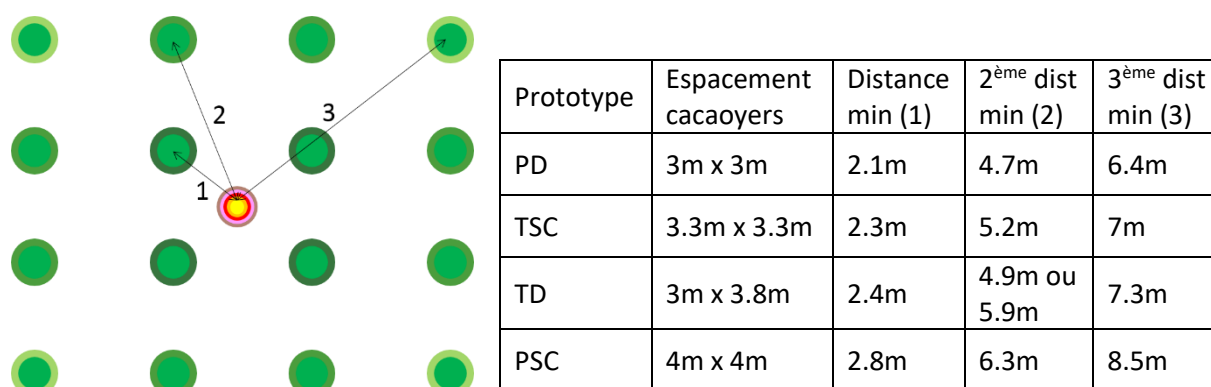


Figure 43. Schéma du motif fréquemment retrouvé dans les prototypes co-conçus (à gauche). Pour 16 cacaoyers formant un quadrilatère (carré pour les prototypes PD, TSC et TD mais rectangle pour le prototype TD), on observe uniquement trois distances différentes avec la plante associée au milieu du quadrat central de cacaoyers (excepté pour TD). On observe alors des distances qui se répètent dans chaque prototype mais qui varient légèrement entre prototypes (Tableau) permettant une analyse solide des interactions entre plantes en fonction de la distance.

CHAPITRE VII. CONCLUSION GENERALE

Le travail réalisé dans cette thèse vise à proposer des améliorations techniques des systèmes agroforestiers (SAF) conduits suivant le cahier des charges biologiques, suivant deux approches. Ces transformations ont pour objectif d'augmenter la production agricole globale de ces systèmes de culture, et ainsi la performance économique si les charges de production sont maîtrisées. La première approche, participative, est basée sur le prototypage et le partage de connaissances, tandis que la seconde est basée sur un diagnostic agronomique et une analyse statistique des SAF et de leur fonctionnement. Les deux méthodes ont abouti à la proposition d'innovations d'optimisation plus que de rupture par rapport aux SAF actuels.

Les SAF existants se composent principalement de cacaoyers hybrides aux origines génétiques inconnues et sont souvent disposés aléatoirement dans la parcelle. Lorsque les cultures associées sont semées ou plantées par le producteur lui-même, elles occupent alors souvent des interstices entre cacaoyers. L'approche participative a fait émerger quatre prototypes de SAF, dont les innovations reposent essentiellement sur (i) le choix des variétés de cacaoyers, (ii) le choix des cultures associées et enfin (iii) l'arrangement spatial des différentes espèces sélectionnées. L'introduction de variétés de cacaoyers connues et étudiées par les institutions de recherche locales combinée à un arrangement spatial régulier devrait donner lieu à une productivité plus importante des cacaoyers. Le choix de cultures associées productives à haute valeur ajoutée comme celles destinées à la production de bois d'œuvre ou d'épices, installées dans des inter-rangs parfois élargis, est particulièrement innovant car ce sont des cultures presque inconnues des producteurs. La densité de chaque culture associée, relativement conséquente par rapport aux SAF actuels, devrait permettre des économies d'échelle.

L'approche agronomique basée sur l'analyse de données recueillies dans des SAF existants a permis de mettre à jour (i) des structures de SAF associées à une production agricole élevée, et (ii) des effets positifs ou négatifs des espèces constituant les SAF sur la productivité en cacao en fonction de leur distance aux cacaoyers. Par cette approche, nous avons déterminé un espacement optimal entre cacaoyers (4m x 4m), ainsi que des distances minimales à respecter entre les cacaoyers et les espèces associées (de 1 à 5m). Par ailleurs, l'étude des performances agroéconomiques à l'échelle parcellaire nous révèle que les SAF les plus prometteurs par rapport à l'objectif fixé comprennent une densité d'arbres associés entre 100 et 400 arbres.ha⁻¹ pour une diversité de cultures associées comprise entre 4 et 6 espèces.

Les deux approches sont profondément différentes de par les outils et techniques de conception mobilisés. Toutefois, certaines innovations sont relativement semblables, comme par exemple l'arrangement spatial régulier dans l'espace des différentes cultures, ce qui les distingue de la structure des SAF actuels. Mais le processus de co-conception fournit des innovations plus fortes que l'approche agronomique au travers de la sélection précise des espèces, parfois même des variétés, à intégrer dans les SAF. En revanche, l'approche agronomique nous informe que les cacaoyers des prototypes co-conçus risquent de ne pas atteindre leur potentiel de production. En effet, les densités de cacaoyers et de cultures associées des prototypes co-conçus s'avèrent élevées et par conséquent les distances entre les cacaoyers et les plantes adjacentes (dont les cacaoyers eux-mêmes) faibles, entraînant de probables effets de compétition. Mais les deux approches sont complémentaires et une démarche d'hybridation des savoirs, dans laquelle le processus de conception participative inclurait les résultats de l'approche agronomique, aurait permis d'éviter ces erreurs d'appréciation des distances minimales à respecter entre individus des SAF. Une méthode encore plus intégrative et formatrice aurait été de

faire prendre part à la collecte des données de terrain de l'approche agronomique, des producteurs impliqués dans le processus de co-conception.

Ces prototypes co-conçus ont été installés ou sont en cours d'installation au sein d'un réseau de parcelles expérimentales chez des producteurs ayant pris part au processus de co-conception. Ce réseau représente une incroyable opportunité pour améliorer nos connaissances sur le fonctionnement des SAF. Il pourra servir à combler nos manques de connaissance scientifique sur l'intérêt écologique des espèces associées, qui ont toutes un potentiel effet (négatif ou positif) sur la durabilité et la productivité des SAF suivant les différentes combinaisons d'espèces. Aussi ce réseau est un contexte idéal pour encourager l'hybridation des savoirs en impliquant davantage une multiplicité d'acteurs, de la filière cacao ou d'autres filières, pour continuer à faire avancer la cacaoculture.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdulai, I., Jassogne, L., Graefe, S., Asare, R., Van Asten, P., Laderach, P., Vaast, P., 2018a. Characterization of cocoa production, income diversification and shade tree management along a climate gradient in Ghana. *PLoS One* 13, e0195777.
- Abdulai, I., Jassogne, L., Graefe, S., Asare, R., Van Asten, P., Laderach, P., Vaast, P., 2018b. Characterization of cocoa production, income diversification and shade tree management along a climate gradient in Ghana. *PLoS One* 13.
- Altieri, M.A., Nicholls, C.I., Henao, A., Lana, M.A., 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 869-890.
- Anderman, T.L., Remans, R., Wood, S.A., DeRosa, K., DeFries, R.S., 2014. Synergies and tradeoffs between cash crop production and food security: a case study in rural Ghana. *Food Security* 6, 541-554.
- Andreotti, F., Mao, Z., Jagoret, P., Speelman, E.N., Gary, C., Saj, S., 2018. Exploring management strategies to enhance the provision of ecosystem services in complex smallholder agroforestry systems. *Ecological Indicators* 94, 257-265.
- Anim-Kwapong, G.J., 2003. Potential of some Neotropical *Albizia* species as shade trees when replanting cacao in Ghana. *Agroforestry Systems* 58, 185-193.
- Armengot, L., Barbieri, P., Andres, C., Milz, J., Schneider, M., 2016. Cacao agroforestry systems have higher return on labor compared to full-sun monocultures. *Agronomy for Sustainable Development* 36.
- Artru, S., Garré, S., Dupraz, C., Hiel, M.-P., Blitz-Frayret, C., Lassois, L., 2017. Impact of spatio-temporal shade dynamics on wheat growth and yield, perspectives for temperate agroforestry. *European Journal of Agronomy* 82, 60-70.
- Bagchi, D., Blaikie, P., Cameron, J., Chattopadhyay, M., Gyawali, N., Seddon, D., 1998. Conceptual and methodological challenges in the study of livelihood trajectories: case-studies in Eastern India and Western Nepal. *Journal of International Development* 10, 453-468.
- Bai, W., Sun, Z., Zheng, J., Du, G., Feng, L., Cai, Q., Yang, N., Feng, C., Zhang, Z., Evers, J.B., van der Werf, W., Zhang, L., 2016. Mixing trees and crops increases land and water use efficiencies in a semi-arid area. *Agricultural Water Management* 178, 281-290.
- Bailey, B.A., Evans, H.C., Phillips-Mora, W., Ali, S.S., Meinhardt, L.W., 2018. *Moniliophthora roreri*, causal agent of cacao frosty pod rot. *Molecular Plant Pathology* 19, 1580-1594.
- Barel, M., 2016. Du cacao au chocolat. L'épopée d'une gourmandise. Editions Quae. 152p
- Barreteau, O., 2003. Our Companion Modelling Approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 6.
- Batista, L., 2009a. Guía Técnica el Cultivo de Cacao en la República Dominicana. CEDAF, p. 185.
- Batista, L., 2009b. Guía Técnica el Cultivo de Cacao en la República Dominicana. Santo Domingo, República Dominicana. 250p.

Beer, J., 1987. Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cacao and tea. *Agroforestry Systems* 5, 3 - 13.

Beer, J., Muschler, R., Kass, D., Somarriba, E., 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. In: Nair, P.K.R., Latt, C.R. (Eds.), *Directions in Tropical Agroforestry Research: Adapted from selected papers presented to a symposium on Tropical Agroforestry organized in connection with the annual meetings of the American Society of Agronomy, 5 November 1996, Indianapolis, Indiana, USA*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 139-164.

Bergez, J.E., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, M.H., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., Sadok, W., 2010. Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy* 32, 3-9.

Berlan, A., Bergés, A., 2013a. Cocoa Production in the Dominican Republic : Sustainability, Challenges and opportunities. 122p.

Berlan, A., Bergés, A., 2013b. Report of findings commissioned by Green & Black's. Cocoa Production in the Dominican Republic : Sustainability Challenges and opportunities. p. 63.

Berlan, A., Bergés, A., 2013c. Report of findings commissioned by Green & Black's. Cocoa Production in the Dominican Republic : Sustainability Challenges and opportunities. University of Manchester. 150 p., p. 63.

Berthet, E.T., Hickey, G.M., Klerkx, L., 2018. Opening design and innovation processes in agriculture: Insights from design and management sciences and future directions. *Agricultural Systems* 165, 111-115.

Berthet, E.T.A., Barnaud, C., Girard, N., Labatut, J., Martin, G., 2015. How to foster agroecological innovations? A comparison of participatory design methods. *Journal of Environmental Planning and Management* 59, 280-301.

Blazy, J.-M., Tixier, P., Thomas, A., Ozier-Lafontaine, H., Salmon, F., Wery, J., 2010. BANAD: A farm model for ex ante assessment of agro-ecological innovations and its application to banana farms in Guadeloupe. *Agricultural Systems* 103, 221-232.

Bodonirina, N., Reibelt, L., Stoudmann, N., Chamagne, J., Jones, T., Ravaka, A., Ranjharivelo, H., Ravonimanantsoa, T., Moser, G., De Grave, A., Garcia, C., Ramamonjisoa, B., Wilmé, L., Waeber, P., 2018. Approaching Local Perceptions of Forest Governance and Livelihood Challenges with Companion Modeling from a Case Study around Zahamena National Park, Madagascar. *Forests* 9.

Bonny, S., 2011. L'agriculture écologiquement intensive : nature et défis. *Cahiers Agricultures* 20.

Bos, A.P., Koerkamp, P.W.G.G., Gosselink, J.M.J., Bokma, S., 2009. Reflexive Interactive Design and its Application in a Project on Sustainable Dairy Husbandry Systems. *Outlook on Agriculture* 38, 137-145.

Bousquet, F., Castella, J.-C., Trébuil, G., Barnaud, C., Boissau, S., Kam, S.P., 2007. Using Multi-Agent Systems in a Companion Modelling Approach for Agroecosystem Management in South-East Asia. *Outlook on Agriculture* 36, 57-62.

Brickhill, D., 2015. Ecosystem services and the environment. In-depth report 11 produced for the European Commission, DG Environment. Available at: <http://ec.europa.eu/science-environment-policy>.

Bureau, J.-C., Thoyer, S., 2014. La politique agricole commune. La Découverte, « Repères », 128 pages. ISBN : 9782707182104. .

Cardozo, E.G., Muchavisoy, H.M., Silva, H.R., Zelarayán, M.L.C., Leite, M.F.A., Rousseau, G.X., Gehring, C., 2015. Species richness increases income in agroforestry systems of eastern Amazonia. *Agroforestry Systems* 89, 901-916.

Catalogna, M., Dubois, M., Navarrete, M., 2018. Diversity of experimentation by farmers engaged in agroecology. *Agronomy for Sustainable Development* 38.

Cerda, R., Allinne, C., Gary, C., Tixier, P., Harvey, C.A., Krolczyk, L., Mathiot, C., Clément, E., Aubertot, J.-N., Avelino, J., 2017. Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems. *European Journal of Agronomy* 82, 308-319.

Cerda, R., Deheuvels, O., Calvache, D., Niehaus, L., Saenz, Y., Kent, J., Vilchez, S., Villota, A., Martinez, C., Somarriba, E., 2014. Contribution of cocoa agroforestry systems to family income and domestic consumption: looking toward intensification. *Agroforestry Systems* 88, 957-981.

Cerdán, C.R., Rebolledo, M.C., Soto, G., Rapidel, B., Sinclair, F.L., 2012. Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems. *Agricultural Systems* 110, 119-130.

Chapagain, T., Pudasaini, R., Ghimire, B., Gurung, K., Choi, K., Rai, L., Magar, S., Bk, B., Raizada, M.N., 2018. Intercropping of maize, millet, mustard, wheat and ginger increased land productivity and potential economic returns for smallholder terrace farmers in Nepal. *Field Crops Research* 227, 91-101.

Clough, Y., Barkmann, J., Juhrendt, J., Kessler, M., Wanger, T.C., Anshary, A., Buchori, D., Cicuzza, D., Darras, K., Putra, D.D., Erasmi, S., Pitopang, R., Schmidt, C., Schulze, C.H., Seidel, D., Steffan-Dewenter, I., Stenchly, K., Vidal, S., Weist, M., Wielgoss, A.C., Tscharntke, T., 2011. Combining high biodiversity with high yields in tropical agroforests. *Proc Natl Acad Sci U S A* 108, 8311-8316.

Clough, Y., Faust, H., Tscharntke, T., 2009. Cacao boom and bust: sustainability of agroforests and opportunities for biodiversity conservation. *Conservation Letters* 2, 197-205.

Córdoba, C., Cerda, R., Deheuvels, O., Hidalgo, E., Declerck, F., 2013. Pollinators, pollination and cocoa production potential in agroforestry systems of Bocas del Toro, Panama. *Agroforesteria en las Américas* 49, 26-32.

Cristofari, H., Girard, N., Magda, D., 2018. How agroecological farmers develop their own practices: a framework to describe their learning processes. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 42, 777-795.

d'Aquino, P., Le Page, C., Bousquet, F., Bah, A., 2003. Using Self-Designed Role-Playing Games and a Multi-Agent System to Empower a Local Decision-Making Process for Land Use Management: the SelfCormas Experiment in Senegal. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 6.

Daily, G., Postel, S., Bawa, K., Kaufman, L., 1997. *Nature's Services: Societal Dependence On Natural Ecosystems*. Bibliovault OAI Repository, the University of Chicago Press.

Damour, G., Garnier, E., Navas, M.-L., Dorel, M., Risede, J.-M., 2015. Using functional traits to analyze the services provided by cover plants: a review of evidence in banana cropping systems, In: D.L., Sparks (Ed.). 34, 81-133.

De Beenhouwer, M., Aerts, R., Honnay, O., 2013. A global meta-analysis of the biodiversity and ecosystem service benefits of coffee and cacao agroforestry. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 175, 1-7.

de Bello, F., Lavorel, S., Díaz, S., Harrington, R., Cornelissen, J.H.C., Bardgett, R.D., Berg, M.P., Cipriotti, P., Feld, C.K., Hering, D., Martins da Silva, P., Potts, S.G., Sandin, L., Sousa, J.P., Storkey, J., Wardle, D.A., Harrison, P.A., 2010. Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodiversity and Conservation* 19, 2873-2893.

Debaeke, P., Munier-Jolain, N., Bertrand, M., Guichard, L., Nolot, J.-M., Faloya, V., Saulas, P., 2009. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 73-86.

Degrade, A., Schreckenber, K., Mbooso, C., Anebeh, P., Okafor, V., Kanmegne, J., 2006. Farmers' fruit tree growing strategies in the humid forest zone of Cameroon and Nigeria. *Agroforestry Systems* 67, 159-175.

Deheuvels, O., 2011. Compromis entre productivité et biodiversité sur un gradient d'intensité de gestion de systèmes agroforestiers à base de cacaoyers de Talamanca, Costa Rica. *SupAgro, Montpellier*. PhD thesis., p. 184.

Deheuvels, O., 2015. Rapport d'expertise. Caractérisation des systèmes de culture du cacaoyer de République Dominicaine dans les provinces de Duarte, Hato Mayor et El Seibo.

Deheuvels, O., Avelino, J., Somarriba, E., Malezieux, E., 2012. Vegetation structure and productivity in cocoa-based agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 149, 181-188.

Deheuvels, O., De Waal, L., Bagny-Beilhe, L., 2017. How habitat heterogeneity affects pollinator's communities in cocoa-based agroforestry systems? In : *Proceedings of the first International Symposium on Cocoa Research ISCR 2017*. Lima, Pérou, 13-17 Novembre 2017.

Deytieu, V., Munier-Jolain, N., Caneill, J., 2016. Assessing the sustainability of cropping systems in single- and multi-site studies. A review of methods. *European Journal of Agronomy* 72, 107-126.

Dias, L.A.S., Santos, M., Santos, A., Almeida, C., Cruz, C., Carneiro, P., 2000. Effect of planting density on yield and incidence of witches' Broom disease in a young plantation of hybrid cacao trees. *Experimental Agriculture* 36.

Dogliotti, S., García, M.C., Peluffo, S., Dieste, J.P., Pedemonte, A.J., Bacigalupe, G.F., Scarlato, M., Alliaume, F., Alvarez, J., Chiappe, M., Rossing, W.A.H., 2014. Co-innovation of family farm systems: A systems approach to sustainable agriculture. *Agricultural Systems* 126, 76-86.

Dominguez, M.A., 1983. 1er paquete tecnologico del cacao. Estacion Experimental del cacao Mata Larga. San Francisco de Macoris, Republica Dominicana.

Dray, S., Dufour, A.B., 2007. The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. *Journal of Statistical Software* 22, 1-20.

Dubon, A., Sanchez, J.A., 2007. Economics of the use of broad leaf tropical timber tree species for shade in cacao plantations. *FHIA*, 19 p.

Duchene, O., Vian, J.-F., Celette, F., 2017. Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 240, 148-161.

Dupraz, C., Simorte, V., Dauzat, M., Bertoni, G., Bernadac, A., Masson, P., 1998. Growth and nitrogen status of young walnuts as affected by intercropped legumes in a Mediterranean climate. *Agroforestry Systems* 43, 71-80.

Evans, H.C., 2016. Witches' Broom Disease (*Moniliophthora perniciosa*): History and Biology. In: Bailey, B.A., Meinhardt, L.W. (Eds.), *Cacao Diseases: A History of Old Enemies and New Encounters*. Springer International Publishing, Cham, pp. 137-177.

FAOSTAT, 2018. Food, Agriculture Organization (FAO) of the United, Nations. Rome. FAOSTAT statistical database. Accessed 14 December 2018.

Faure, G., Gasselin, P., Triomphe, B., Temple, L., Hocdé, H., 2009. Innover avec les acteurs du monde rural : la recherche-action en partenariat. *Agricultures tropicales en poche*.

Feintrenie, L., Levang, P., 2009. Sumatra's Rubber Agroforests: Advent, Rise and Fall of a Sustainable Cropping System. *Small-scale Forestry* 8, 323-335.

FERSAN, 2009. Huanglongbing. El enverdecimiento de los citricos (HLB) y su vector psilido (*Diaphorina citri*) en la Republica Dominicana. FERSANITO, Boletín informativo, 12p.

Fischer, J., Manning, A.D., Steffen, W., Rose, D.B., Daniell, K., Felton, A., Garnett, S., Gilna, B., Heinsohn, R., Lindenmayer, D.B., MacDonald, B., Mills, F., Newell, B., Reid, J., Robin, L., Sherren, K., Wade, A., 2007. Mind the sustainability gap. *Trends in Ecology & Evolution* 22, 621-624.

Gidoin, C., Avelino, J., Deheuvels, O., Cilas, C., Bieng, M.A.N., 2014a. Shade Tree Spatial Structure and Pod Production Explain Frosty Pod Rot Intensity in Cacao Agroforests, Costa Rica. *Phytopathology* 104, 275-281.

Gidoin, C., Babin, R., Bagny Beilhe, L., Cilas, C., ten Hoopen, G.M., Bieng, M.A.N., 2014b. Tree Spatial Structure, Host Composition and Resource Availability Influence Mirid Density or Black Pod Prevalence in Cacao Agroforests in Cameroon. *PLOS ONE* 9, e109405.

Gillespie, A.R., Jose, S., Mengel, D.B., Hoover, W.L., Pope, P.E., Seifert, J.R., Biehle, D.J., Stall, T., Benjamin, T.J., 2000. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA: 1. Production physiology. *Agroforestry Systems* 48, 25-40.

Gockowski, J., Weise, S., Sonwa, D., Tchatat, M., Ngobo, M., 2004. Conservation because it pays, shaded cocoa agroforests in west Africa. *National Academy of Sciences* 10, 29p.

Gomes, L.d.C., Cardoso, I.M., Mendonça, E.d.S., Fernandes, R.B.A., Lopes, V.S., Oliveira, T.S., 2016. Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. *Agricultural and Forest Meteorology* 224, 30-39.

Gottwald, T.R., 2007. Citrus Canker and Citrus Huanglongbing, two Exotic Bacterial Diseases Threatening the Citrus Industries of the Western Hemisphere. *Outlooks on Pest Management* 18, 274-279.

Graefe, S., Meyer-Sand, L.F., Chauvette, K., Abdulai, I., Jassogne, L., Vaast, P., Asare, R., 2017. Evaluating Farmers' Knowledge of Shade Trees in Different Cocoa Agro-Ecological Zones in Ghana. *Human Ecology* 45, 321-332.

Graves, A.R., Burgess, P.J., Palma, J., Keesman, K.J., van der Werf, W., Dupraz, C., van Keulen, H., Herzog, F., Mayus, M., 2010. Implementation and calibration of the parameter-sparse Yield-SAFE model to predict production and land equivalent ratio in mixed tree and crop systems under two contrasting production situations in Europe. *Ecological Modelling* 221, 1744-1756.

Griffon, M., 2011. Pour des agricultures écologiquement intensives. L'Aube. 144p.

Groeneveld, J.H., Tschardtke, T., Moser, G., Clough, Y., 2010. Experimental evidence for stronger cacao yield limitation by pollination than by plant resources. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 12, 183-191.

Hartemink, A.E., 2005. Nutrient Stocks, Nutrient Cycling, and Soil Changes in Cocoa Ecosystems: A Review. *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 227-253.

Hatchuel, A., Weil, B., 2008. C-K design theory: an advanced formulation. *Research in Engineering Design* 19, 181.

Hazard, L., Steyaert, P., Martin, G., Couix, N., Navas, M.-L., Duru, M., Lauvie, A., Labatut, J., 2017. Mutual learning between researchers and farmers during implementation of scientific principles for sustainable development: the case of biodiversity-based agriculture. *Sustainability Science Online*, 14 p.

Hervé, M., 2016. RVAideMemoire-package: Testing and Plotting Procedures for Biostatistics.

Hill, S.B., MacRae, R.J., 1996. Conceptual Framework for the Transition from Conventional to Sustainable Agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture* 7, 81-87.

Husson, F., Le, S., Pages, J., 2010. Exploratory Multivariate Analysis by Example Using R, Chapman and Hall.

Husson, O., Tran Quoc, H., Boulakia, S., Chabanne, A., Tivet, F., Bouzinac, S., Lienhard, P., Michellon, R., Chabierski, S., Boyer, J., Enjalric, F., Rakotondramanana, Moussa, N., Jullien, F., Balarabe, O., Rattanatrav, B., Castella, J.-C., Charpentier, H., Séguy, L., 2015. Co-designing innovative cropping systems that match biophysical and socio-economic diversity: The DATE approach to Conservation Agriculture in Madagascar, Lao PDR and Cambodia. *Renewable Agriculture and Food Systems* 31, 452-470.

ICCO, 2016. Quarterly Bulletins of Cocoa Statistics, Vol XLII No 1.

Isaac, M.E., Timmer, V.R., Quashie-Sam, S.J., 2007. Shade tree effects in an 8-year-old cocoa agroforestry system: biomass and nutrient diagnosis of *Theobroma cacao* by vector analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 78, 155-165.

Jagoret, P., Deheuvels, O., Bastide, P., 2014a. Sustainable cocoa production. Learning from agroforestry. . *Perspective n° 27 (CIRAD)*, 4p.

Jagoret, P., Kwessey, J., Messie, C., Michel-Dounias, I., Malézieux, E., 2014b. Farmers' assessment of the use value of agrobiodiversity in complex cocoa agroforestry systems in central Cameroon. *Agroforestry Systems* 88, 983-1000.

Jagoret, P., Michel-Dounias, I., Malézieux, E., 2011. Long-term dynamics of cocoa agroforests: a case study in central Cameroon. *Agroforestry Systems* 81, 267-278.

Jagoret, P., Michel-Dounias, I., Snoeck, D., Ngnogué, H.T., Malézieux, E., 2012. Afforestation of savannah with cocoa agroforestry systems: a small-farmer innovation in central Cameroon. *Agroforestry Systems* 86, 493-504.

Jagoret, P., Michel, I., Ngnogué, H.T., Lachenaud, P., Snoeck, D., Malézieux, E., 2017a. Structural characteristics determine productivity in complex cocoa agroforestry systems. *Agronomy for Sustainable Development* 37.

Jagoret, P., Ngnogue, H.T., Malézieux, E., Michel, I., 2018. Trajectories of cocoa agroforests and their drivers over time: Lessons from the Cameroonian experience. *European Journal of Agronomy* 101, 183-192.

Jagoret, P., Snoeck, D., Bouambi, E., Ngnogue, H.T., Nyassé, S., Saj, S., 2017b. Rehabilitation practices that shape cocoa agroforestry systems in Central Cameroon: key management strategies for long-term exploitation. *Agroforestry Systems*, 15p.

Jagoret, P., Snoeck, D., Bouambi, E., Ngnogue, H.T., Nyassé, S., Saj, S., 2017c. Rehabilitation practices that shape cocoa agroforestry systems in Central Cameroon: key management strategies for long-term exploitation. *Agroforestry Systems*.

Janssen, S., Louhichi, K., Kanellopoulos, A., Zander, P., Flichman, G., Hengsdijk, H., Meuter, E., Andersen, E., Belhouchette, H., Blanco, M., Borkowski, N., Heckeley, T., Hecker, M., Li, H., Oude Lansink, A., Stokstad, G., Thorne, P., van Keulen, H., van Ittersum, M.K., 2010. A Generic Bio-Economic Farm Model for Environmental and Economic Assessment of Agricultural Systems. *Environmental Management* 46, 862-877.

Jezeer, R.E., Santos, M.J., Boot, R.G.A., Junginger, M., Verweij, P.A., 2018. Effects of shade and input management on economic performance of small-scale Peruvian coffee systems. *Agricultural Systems* 162, 179-190.

Jezeer, R.E., Verweij, P.A., Santos, M.J., Boot, R.G.A., 2017. Shaded Coffee and Cocoa – Double Dividend for Biodiversity and Small-scale Farmers. *Ecological Economics* 140, 136-145.

Johnson, E.S., Rutherford, M.A., Edgington, S., Flood, J., Crozier, J., Cafá, G., Buddie, A.G., Offord, L., Elliott, S.M., Christie, K.V., 2017. First report of *Moniliophthora roreri* causing frosty pod rot on *Theobroma cacao* in Jamaica. *New Disease Reports* 36, 1p.

Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18, 267-288.

Kremen, C., Miles, A., 2012. Ecosystem Services in Biologically Diversified versus Conventional Farming Systems: Benefits, Externalities, and Trade-Offs. *Ecology and Society* 17.

Lamanda, N., Roux, S., Delmotte, S., Merot, A., Rapidel, B., Adam, M., Wery, J., 2012. A protocol for the conceptualisation of an agro-ecosystem to guide data acquisition and analysis and expert knowledge integration. *European Journal of Agronomy* 38, 104-116.

Lançon, J., Wery, J., Rapidel, B., Angokaye, M., Géraudeau, E., Gaborel, C., Ballo, D., Fadegnon, B., 2007. An improved methodology for integrated crop management systems. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 101-110.

Le Bellec, F., Rajaud, A., Ozier-Lafontaine, H., Bockstaller, C., Malezieux, E., 2011. Evidence for farmers' active involvement in co-designing citrus cropping systems using an improved participatory method. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 703-714.

Le Gal, P.Y., Dugué, P., Faure, G., Novak, S., 2011. How does research address the design of innovative agricultural production systems at the farm level? A review. *Agricultural Systems* 104, 714-728.

Leakey, R., Tchoundjeu, Z., Schreckenberg, K., Shlackleton, S., Shlackleton, C., 2005. Agroforestry Tree Products Targeting Poverty Reduction and Enhanced Livelihoods. *International Journal of Agricultural Sustainability* 3.

Lehébel-Péron, A., Feintrenie, L., Levang, P., 2011. Rubber Agroforests' Profitability, the Importance of Secondary Products. *Forests, Trees and Livelihoods* 20, 69-84.

Lernoud, J., Potts, J., Sampson, G., Schlatter, B., Huppe, G., Voora, V., Willer, H., Wozniak, J., Dang, D., 2018. The State of Sustainable Markets – Statistics and Emerging Trends 2018. ITC, Geneva. <http://www.intracen.org/uploadedFiles/intracenorg/Content/Publications/Sustainability%202018%20Layout-FIN-web2.pdf>.

Lockwood, G., Yin, J.P.T., 1996. Yields of Cocoa Clones in Response to Planting Density in Malaysia. *Experimental Agriculture* 32, 41-47.

Loguercio, L., Santos, L., Niella, G., Miranda, R., De Souza, J., Collins, R., Pomella, A., 2009. Canopy-microclimate effects on the antagonism between *Trichoderma stromaticum* and *Moniliophthora perniciosa* in shaded cacao. *Plant Pathology* 58, 1104-1115.

Malézieux, E., 2011. Designing cropping systems from nature. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 15-29.

Malézieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., Tournonnet, S., Valantin-Morison, M., 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 43-62.

Martin, G., Felten, B., Duru, M., 2011. Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems. *Environmental Modelling & Software* 26, 1442-1453.

Mattalia, G., 2016. Master thesis. Characterization and resilience assessment of cocoa agroforestry systems in the Dominican Republic. ISARA Lyon and Wageningen University, p. 75.

Mazoyer, M., Roudart, L., 1997. *Histoire des agricultures du monde*. Editions du Seuil, Paris, 545 p.

Mbow, C., Van Noordwijk, M., Luedeling, E., Neufeldt, H., Minang, P.A., Kowero, G., 2014. Agroforestry solutions to address food security and climate change challenges in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 6, 61-67.

McIntyre, B., Herren, H., Wakhungu, J., Watson, R.e., 2009. Agriculture at a crossroads. International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development (IAASTD). Global report, Island Press, Washington, 590 p.

MEA, 2005. Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being : synthesis. Washington, DC: Island Press. ISBN 1-59726-040-1.

Mead, R., Willey, R.W., 1980. The Concept of a 'Land Equivalent Ratio' and Advantages in Yields from Intercropping. *Experimental Agriculture* 16, 217-228.

Medeiros, F., Pomella, A., De Souza, J., Niella, G., Valle, R., Bateman, R., Fravel, D., Vinyard, B., Hebbar, P., 2010. A novel, integrated method for management of witches' broom disease in Cacao in Bahia, Brazil. *Crop Protection* 29, 704-711.

Meinhardt, L.W., Rincones, J., Bailey, B.A., Aime, M.C., Griffith, G.W., Zhang, D., Pereira, G.A., 2008. *Moniliophthora perniciosa*, the causal agent of witches' broom disease of cacao: what's new from this old foe? *Mol Plant Pathol* 9, 577-588.

Meylan, L., Gary, C., Allinne, C., Ortiz, J., Jackson, L., Rapidel, B., 2017. Evaluating the effect of shade trees on provision of ecosystem services in intensively managed coffee plantations. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 245, 32-42.

Meylan, L., Merot, A., Gary, C., Rapidel, B., 2013. Combining a typology and a conceptual model of cropping system to explore the diversity of relationships between ecosystem services: The case of erosion control in coffee-based agroforestry systems in Costa Rica. *Agricultural Systems* 118, 52-64.

Meynard, J.-M., Dedieu, B., Bos, A.P., 2012. Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. In: Darnhofer, I., Gibbon, D., Dedieu, B. (Eds.), *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 405-429.

Meynard, J.-M., Jeuffroy, M.-H., Le Bail, M., Lefèvre, A., Magrini, M.-B., Michon, C., 2017. Designing coupled innovations for the sustainability transition of agrifood systems. *Agricultural Systems* 157, 330-339.

Michler, J.D., Josephson, A.L., 2017. To Specialize or Diversify: Agricultural Diversity and Poverty Dynamics in Ethiopia. *World Development* 89, 214-226.

Miller, A.W., Pallardy, S.G., 2001. Resource competition across the crop-tree interface in a maize-silver maple temperate alley cropping stand in Missouri. *Agroforestry Systems* 53, 247-259.

Ministerio de Agricultura, 2017. Datos de transparencia. <http://agricultura.gob.do/transparencia/index.php/estadisticas/estadisticas-agropecuarias/category/981-precios-del-productor>.

Mortimer, R., Saj, S., David, C., 2017a. Supporting and regulating ecosystem services in cacao agroforestry systems. *Agroforestry Systems*.

Mortimer, R., Saj, S., David, C., 2017b. Supporting and regulating ecosystem services in cacao agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 19p.

Mossu, G., 1990. *Le cacaoyer*. Maisonneuve et Larose.

Motamayor, J.C., Lachenaud, P., da Silva, E.M.J.W., Loor, R., Kuhn, D.N., Brown, J.S., Schnell, R.J., 2008. Geographic and genetic population differentiation of the Amazonian chocolate tree (*Theobroma cacao* L). *PLoS One* 3, e3311.

- Motamayor, J.C., Risterucci, A.M., Lopez, P.A., Ortiz, C.F., Moreno, A., Lanaud, C., 2002. Cacao domestication I: the origin of the cacao cultivated by the Mayas. *Heredity* 89, 380-386.
- Mutuo, P.K., Cadisch, G., Albrecht, A., Palm, C.A., Verchot, L., 2005. Potential of agroforestry for carbon sequestration and mitigation of greenhouse gas emissions from soils in the tropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 71, 43-54.
- Navarrete, M., Brives, H., Catalogna, M., Gouttenoire, L., Heinisch, C., Lamine, C., OLLION, E., Simon, S., 2018. Farmers' involvement in collective experimental designs in a French region, Rhône-Alpes. How do they contribute to farmers' learning and facilitate the agroecological transition? , 13th European IFSA Symposium (IFSA 2018), La Canée (Crete), Greece.
- Niether, W., Schneidewind, U., Armengot, L., Adamtey, N., Schneider, M., Gerold, G., 2017. Spatial-temporal soil moisture dynamics under different cocoa production systems. *Catena* 158, 340-349.
- Nijmeijer, A., Lauri, P.-E., Harmand, J.-M., Freschet, G.T., Essobo Nieboukaho, J.-D., Fogang, P.K., Enock, S., Saj, S., 2019a. Long-term dynamics of cocoa agroforestry systems established on lands previously occupied by savannah or forests. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 275, 100-111.
- Nijmeijer, A., Lauri, P.-É., Harmand, J.-M., Saj, S., 2019b. Carbon dynamics in cocoa agroforestry systems in Central Cameroon: afforestation of savannah as a sequestration opportunity. *Agroforestry Systems* 93, 851-868.
- Notaro, M., Metay, A., Freguin-Gresh, S., Le Coq, J.F., Siles Gutierrez, P., Rapidel, B., 2015. Design of agroforestry systems with coffee is facilitated by the description of relationships between ecosystem services provided. In : *Proceedings of the International Symposium for Farming Systems Design: Multi-functional farming systems in a changing world*. Gritti E., Wery J. (eds). Montpellier, 7-10 Septembre 2015.
- Oke, D.O., Odebiyi, K.A., 2007. Traditional cocoa-based agroforestry and forest species conservation in Ondo State, Nigeria. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 122, 305-311.
- ONE, 2016a. Boletín de estadísticas oficiales de pobreza monetaria. Oficina Nacional de Estadísticas.
- ONE, 2016b. Boletín de estadísticas oficiales de pobreza monetaria. Oficina Nacional de Estadísticas, p. 20p.
- Orozco-Aguilar, L., López Sampson, A., 2017. Pollination in cacao: how useful is to improve productivity?
- Osei-Bonsu, K., Opoku-Ameyaw, K., Amoah, F.M., Oppong, F.K., 2002. Cacao-coconut intercropping in Ghana. Agronomic and economic perspectives. *Agroforestry Systems* 55, 1 - 8.
- Paul, C., Weber, M., Knoke, T., 2017. Agroforestry versus farm mosaic systems – Comparing land-use efficiency, economic returns and risks under climate change effects. *Science of The Total Environment* 587-588, 22-35.
- Pelzer, E., Fortino, G., Bockstaller, C., Angevin, F., Lamine, C., Moonen, C., Vasileiadis, V., Guérin, D., Guichard, L., Reau, R., Messéan, A., 2012. Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological Indicators* 18, 171-182.
- Phillips-Mora, W., Aime, M.C., Wilkinson, J., 2007. Biodiversity and biogeography of the cacao (*Theobroma cacao*) pathogen *Moniliophthora roreri* in tropical America. *Plant Pathology*, 911 - 922.

Querné, A., Battie-laclau, P., Dufour, L., Wery, J., Dupraz, C., 2017. Effects of walnut trees on biological nitrogen fixation and yield of intercropped alfalfa in a Mediterranean agroforestry system. *European Journal of Agronomy* 84, 35-46.

R Core Team, 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Rahaman, M., Rahman, A., Miah, M., Hoque, M.A., Rahman, M., 2018. Productivity and Profitability of Jackfruit-Eggplant Agroforestry System in the Terrace Ecosystem of Bangladesh. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology* 6, 124.

Ramirez, O.A., Somarriba, E., Ludewigs, T., Ferreira, P., 2001. Financials returns, stability and risk of cacao plantain timber agroforestry systems in Central America. *Agroforestry Systems* 51, 141 - 154.

Rapidel, B., Le Coq, J.-F., Declerck, F., Beer, J., 2011. Measurement and payment of ecosystem services from agriculture and agroforestry. *New insights from the neotropics*. pp. p. 377-395.

Rapidel, B., Ripoche, A., Allinne, C., Metay, A., Deheuvels, O., Lamanda, N., Blazy, J.-M., Valdés-Gómez, H., Gary, C., 2015. Analysis of ecosystem services trade-offs to design agroecosystems with perennial crops. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 1373-1390.

Rapidel, B., Traoré, B.S., Sissoko, F., Lançon, J., Wery, J., 2009. Experiment-based prototyping to design and assess cotton management systems in West Africa. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 545-556.

Ravier, C., Prost, L., Jeuffroy, M.-H., Wezel, A., Paravano, L., Reau, R., 2015. Multi-criteria and multi-stakeholder assessment of cropping systems for a result-oriented water quality preservation action programme. *Land Use Policy* 42, 131-140.

Reau, R., Doré, T., 2008a. Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer? Educagri Editions.

Reau, R., Doré, T., 2008b. Systèmes de culture innovants et durables. Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Educagri éditions/AgroParisTech, 176p.

Reau, R., Monnot, L.-A., Schaub, A., Munier-Jolain, N., Pambou, I., Bockstaller, C., Cariolle, M., Chabert, A., Dumans, P., 2012. Les ateliers de conception de systèmes de culture pour construire, évaluer et identifier des prototypes prometteurs. *Innov. Agron.* 20.

Redpath, S.M., Keane, A., Andren, H., Baynham-Herd, Z., Bunnefeld, N., Duthie, A.B., Frank, J., Garcia, C.A., Mansson, J., Nilsson, L., Pollard, C.R.J., Rakotonarivo, O.S., Salk, C.F., Travers, H., 2018. Games as Tools to Address Conservation Conflicts. *Trends Ecol Evol* 33, 415-426.

Rice, R., Greenberg, R., 2000. Cacao cultivation and the conservation of Biological diversity. *Royal Swedish Academy of Sciences* 29, 7 p.

Rigal, C., Vaast, P., Xu, J., 2018. Using farmers' local knowledge of tree provision of ecosystem services to strengthen the emergence of coffee-agroforestry landscapes in southwest China. *PLOS ONE* 13, e0204046.

Robertson, G.P., Swinton, S.M., 2005. Reconciling agricultural productivity and environmental integrity: a grand challenge for agriculture. *Frontiers in Ecology and the Environment* 3, 38-46.

Rousseau, G.X., Deheuvels, O., Rodriguez Arias, I., Somarriba, E., 2012. Indicating soil quality in cacao-based agroforestry systems and old-growth forests: The potential of soil macrofauna assemblage. *Ecological Indicators* 23, 535-543.

Ruf, F.O., 2011. The Myth of Complex Cocoa Agroforests: The Case of Ghana. *Hum Ecol Interdiscip J* 39, 373-388.

Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J.-É., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Doré, T., 2008. Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 163-174.

Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J.-E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Messéan, A., Doré, T., 2009. MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 447-461.

Saj, S., Durot, C., Mvondo Sakouma, K., Tayo Gamo, K., Avana-Tientcheu, M.-L., 2017a. Contribution of associated trees to long-term species conservation, carbon storage and sustainability: a functional analysis of tree communities in cacao plantations of Central Cameroon. *International Journal of Agricultural Sustainability* 15, 282-302.

Saj, S., Jagoret, P., 2017. Traditional cacao agroforestry in Central Africa can provide both respectable yields and levels of ecosystem services. *International Symposium on Cocoa Research (ISCR) Lima, Peru, 13-17 November 2017*.

Saj, S., Torquebiau, E., Hainzelin, E., Pages, J., Maraoux, F., 2017b. The way forward: An agroecological perspective for Climate-Smart Agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 250, 20-24.

Salazar-Díaz, R., Tixier, P., 2017a. Effect of plant diversity on income generated by agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 10p.

Salazar-Díaz, R., Tixier, P., 2017b. Effect of plant diversity on income generated by agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agroforestry Systems*.

Salembier, C., Elverdin, J.H., Meynard, J.-M., 2015. Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. *Agronomy for Sustainable Development* 36.

Salgado-Mora, M.G., Ibarra-Núñez, G., Marcías-Sámano, J.E., López-Báez, O., 2007. Diversidad arborea en cacaotales del Soconusco, Chiapas, Mexico. *Interciencia* 32, 763 - 768.

Schawe, C., Kessler, M., Hensen, I., Tschardt, T., 2016. Abundance and diversity of flower visitors on wild and cultivated cacao (*Theobroma cacao* L.) in Bolivia. *Agroforestry Systems*.

Schneider, M., Andres, C., Trujillo, G., Alcon, F., Amurrio, P., Perez, E., Weibel, F., Milz, J., 2016. Cocoa and Total System Yields of Organic and Conventional Agroforestry Vs. Monoculture Systems in a Long-Term Field Trial in Bolivia. *Experimental Agriculture* 53, 351-374.

Schneider, M., Andres, C., Trujillo, G., Alcon, F., Amurrio, P., Perez, E., Weibel, F., Milz, J., 2017. COCOA AND TOTAL SYSTEM YIELDS OF ORGANIC AND CONVENTIONAL AGROFORESTRY VS. MONOCULTURE SYSTEMS IN A LONG-TERM FIELD TRIAL IN BOLIVIA. *Experimental Agriculture* 53, 351-374.

Schroth, G., Bede, L., Paiva, A., Cassano, C., Amorim, A., Faria, D., Mariano-Neto, E., Martini, A.M.Z., Sambuichi, R., Lôbo, R., 2015. Contribution of agroforests to landscape carbon storage. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 20, 1175-1190.

Schroth, G., do Socorro Souza da Mota, M., 2014. Agroforestry: Complex Multistrata Agriculture. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, pp. 195-207.

Schwendenmann, L., Veldkamp, E., Moser, G., HÖlscher, D., KÖhler, M., Clough, Y., Anas, I., Djajakirana, G., Erasmi, S., Hertel, D., Leitner, D., Leuschner, C., Michalzik, B., Propastin, P., Tjoa, A., Tschardt, T., van Straaten, O., 2009. Effects of an experimental drought on the functioning of a cacao agroforestry system, Sulawesi, Indonesia. *Global Change Biology* 16, 1515-1530.

SEA, 2016. Estadísticas del ministerio de agricultura de Republica Dominicana.

Seghier, J., Harmand, J.-M., 2019. Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale. Editions Quae. 252p.

Seserman, D.M., Veste, M., Freese, D., Swieter, A., Langhof, M., 2018. Benefits of agroforestry systems for Land Equivalent Ratio - case studies in Brandenburg and Lower Saxony, Germany. *European Agroforestry Federation/University of Santiago de Compostela, Lugo*, pp. 26-29.

Sheil, D., Purl, R., Basuki, I., van Heist, M., Wan, M., Liswanti, N., Rukmiyati, Agung Sardjono, M., Samsudin, I., Sidiyasa, K., Chrisandini, Permana, E., Mangopo Angi, E., Gatzweiler, B., Johnson, B., Wijaya, A., 2004. A la découverte de la biodiversité, de l'environnement et des perspectives des populations locales dans les paysages forestiers. Méthodes pour une étude pluridisciplinaire du paysage. CGIAR, p. 109.

Sileshi, G., Mafongoya, P.L., 2006. Long-term effects of improved legume fallows on soil invertebrate macrofauna and maize yield in eastern Zambia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 115, 69-78.

Simon, S., Lesueur-Jannoyer, M., Plénet, D., Lauri, P.-É., Le Bellec, F., 2017. Methodology to design agroecological orchards: Learnings from on-station and on-farm experiences. *European Journal of Agronomy* 82, 320-330.

Smith Dumont, E., Gnahoua, G.M., Ohouo, L., Sinclair, F.L., Vaast, P., 2014. Farmers in Côte d'Ivoire value integrating tree diversity in cocoa for the provision of ecosystem services. *Agroforestry Systems* 88, 1047-1066.

Somarriba, E., Beer, J., 2010. Productivity of Theobroma cacao agroforestry systems with timber or legume service shade trees. *Agroforestry Systems* 81, 109-121.

Somarriba, E., Cerda, R., Orozco-Aguilar, L., Cifuentes, M., Dávila, H., Espin, T., Mavisoy Muchavisoy, H., Ávila, G., Alvarado, E., Poveda, V., Astorga, C., Say, E., Deheuvels, O., 2013. Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America.

Sonwa, D.J., Weise, S.F., Schroth, G., Janssens, M.J.J., Howard-Yana, S., 2014. Plant diversity management in cocoa agroforestry systems in West and Central Africa—effects of markets and household needs. *Agroforestry Systems* 88, 1021-1034.

Speelman, E.N., García-Barrios, L.E., Groot, J.C.J., Tiftonell, P., 2014. Gaming for smallholder participation in the design of more sustainable agricultural landscapes. *Agricultural Systems* 126, 62-75.

Stroesser, L., Penot, E., Michel, I., Tongkaemkaew, U., Chambon, B., 2018. Income diversification for rubber farmers through agroforestry practices. *Revue internationale des études du développement* 235, 1-24.

Suarez Salazar, J.C., Ngo Bieng, M.A., Melgarejo, L.M., Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., 2018a. First typology of cacao (*Theobroma cacao* L.) systems in Colombian Amazonia, based on tree species richness, canopy structure and light availability. *PLoS One* 13.

Suarez Salazar, J.C., Ngo Bieng, M.A., Melgarejo, L.M., Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., 2018b. First typology of cacao (*Theobroma cacao* L.) systems in Colombian Amazonia, based on tree species richness, canopy structure and light availability. *PLoS One* 13, e0191003.

Talbot, G., 2011. Spatiotemporal integration of resources sharing in a walnut-cereals silvoarable agroforestry system: a key to understanding productivity? Thèse de doctorat de Montpellier SupAgro, 281 p.

Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671-677.

Toffolini, Q., Jeuffroy, M.-H., Mischler, P., Pernel, J., Prost, L., 2017. Farmers' use of fundamental knowledge to re-design their cropping systems: situated contextualisation processes. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 80, 37-47.

Tscharntke, T., Clough, Y., Wanger, T.C., Jackson, L., Motzke, I., Perfecto, I., Vandermeer, J., Whitbread, A., 2012. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biological Conservation* 151, 53-59.

Turnbull, C.J., Hadley, P., 2017. International Cocoa Germplasm Database (ICGD). [Online Database]. CRA Ltd./ICE Futures Europe/University of Reading, UK. Available: <http://www.icgd.reading.ac.uk> (29th July, 2019).

Vaast, P., Somarriba, E., 2014. Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agroforestry Systems* 88, 947-956.

Vall, E., Chia, E., Blanchard, M., Mahamoudou, K., Coulibaly, K., Andrieu, N., 2016. La co-conception en partenariat de systèmes agricoles innovants. *Cahiers Agricultures* 25, 15001.

van Asten, P.J.A., Wairegi, L.W.I., Mukasa, D., Uringi, N.O., 2011. Agronomic and economic benefits of coffee–banana intercropping in Uganda's smallholder farming systems. *Agricultural Systems* 104, 326-334.

Ventura, M., María, A., 2016. Caracterización morfológica, química y organoléptica de clones de cacao introducidos a República Dominicana. Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF). Santo Domingo, DO., 106 p.

Vereijken, 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems in interaction with pilot farms. *European Journal of Agronomy* 7, 235 - 250.

Voinov, A., Bousquet, F., 2010. Modelling with stakeholders. *Environmental Modelling & Software* 25, 1268-1281.

Wibaux, T., Konan, D.-C., Snoeck, D., Jagoret, P., Bastide, P., 2018. STUDY OF TREE-TO-TREE YIELD VARIABILITY AMONG SEEDLING-BASED CACAO POPULATIONS IN AN INDUSTRIAL PLANTATION IN CÔTE D'IVOIRE. *Experimental Agriculture* 54, 719-730.

Wood, G.A.R., Lass, R.A., 2001. *Cocoa*, 4th Edition. Wiley-Blackwell.

Wood, S., Karp, D., Declerck, F., Kremen, C., Naeem, S., Palm, C., 2015. Functional traits in agriculture: Agrobiodiversity and ecosystem services. *Trends in ecology & evolution* 30.

Zhang, W., Ricketts, T.H., Kremen, C., Carney, K., Swinton, S.M., 2007. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics* 64, 253-260.

Zhu, X., Chen, C., Wu, J., Yang, J., Zhang, W., Zou, X., Liu, W., Jiang, X., 2019. Can intercrops improve soil water infiltrability and preferential flow in rubber-based agroforestry system? *Soil and Tillage Research* 191, 327-339.

ANNEXES

Annexe 1. Méthode de calcul du revenu minimum à atteindre

Pour parvenir au revenu minimal par an par unité de surface, nous avons considéré des variables au niveau de l'exploitation permettant d'atteindre à minima 1115US\$.an⁻¹.pers⁻¹, revenu *per capita* définissant le seuil de pauvreté en République Dominicaine (*Oficina Nacional de Estadísticas* ONE, 2016). Nous l'avons calculé de façon à ce qu'au moins 75% des exploitations agricoles possédant uniquement des systèmes agroforestiers sans aucune autre activité puissent générer un revenu supérieur au seuil de pauvreté. La formule utilisée a été la suivante :

$$x = RpC \left(\frac{PàC}{Surf - SAF} \right)$$

Où

RpC : revenu per capita fixant le seuil de pauvreté en République Dominicaine (1115 US\$.an⁻¹.pers⁻¹)

PàC = nombre de personnes à charge pour l'agriculteur

Surf- SAF = surface de SAF de l'exploitation

Sur les 140 exploitations étudiées lors du diagnostic de Notaro et al. (2019), 86 n'avaient que des systèmes agricoles de types agroforestiers à base de cacaoyers. Pour ces 86 exploitations, le 3^{ème} quartile du boxplot du rapport (PàC/Surf-SAF) est égal à 5.33. En faisant l'hypothèse qu'aucune charge n'incombe au producteur (ni coût de main d'oeuvre, ni coût de matériel), le GI par hectare par an permettant *a minima* aux ménages vivant des SAF de sortir de la pauvreté s'élève donc à 5943 US\$.ha⁻¹.an⁻¹.

Annexe 2. Liste des 110 variétés de cacaoyers de République Dominicaine dont 55 ont été importées et 55 sont endémiques présentant les performances agronomiques de ces différentes variétés utilisés comme critères de sélection lors du processus de co-conception (construit à partir des données de Ventura and María (2016) et Turnbull and Hadley (2017)).

Clones	Productivité (kg sec,cacaoyer ⁻¹)	Auto- compatibilité	Tolérance à la pourriture brune	Tolérance à la moniliose	Tolérance au balai de sorcière
ICS-1	2,7	64%	45%	13%	86%
ICS-8	1,0	86%	56%	-	40%
ICS-39	6,4	13%	63%	-	100%
ICS-40	2,5	17%	80%	-	100%
ICS-60	1,6	11%	60%	-	100%
ICS-95	2,3	88%	73%	100%	100%
UF-29	1,5	86%	43%	0%	0%
UF-168	2,3	0%	0%	0%	-
UF-221	5,6	67%	13%	0%	-
UF-242	2,7	100%	0%	0%	-
UF-296	2,9	25%	33%	50%	0%
UF-613	1,3	14%	83%	50%	-
UF-668	3,5	67%	0%	0%	100%
UF-676	5,1	40%	0%	0%	-
UF-677	3,5	25%	0%	0%	-
GS-36	2,2	80%	75%	100%	50%
R-2	3,4	0%	100%	0%	-
R-15	2,1	0%	100%	0%	-
R-52	-	50%	0%	0%	-
R-75	2,5	0%	0%	-	-
R-117	2,5	0%	0%	0%	-
PA-121	2,0	33%	80%	0%	100%
POUND-7	2,6	29%	100%	100%	67%
IMC-67	1,6	22%	10%	0%	50%
SIAL-98	-	100%	-	0%	-
SIAL-325	0,9	83%	33%	0%	-
CATONGO	1,6	50%	55%	0%	-
SIC-1	1,2	100%	0%	0%	-
SIC-2	1,4	33%	0%	0%	-
SPA-9	1,6	29%	100%	0%	100%
EET-19	2,5	50%	100%	50%	100%
EET-95	4,0	50%	67%	0%	50%
EET-103	-	0%	-	-	33%
EET-228	1,8	100%	0%	0%	100%
EET-250	1,2	50%	100%	0%	-
EET-333	-	-	-	-	-
EET-390	0,6	0%	50%	0%	100%
EET-397	1,6	0%	25%	0%	100%

EET-399	1,6	25%	100%	0%	67%
TSH-565	1,4	25%	67%	0%	75%
CC-9	1,8	67%	25%	0%	-
CC-10	1,8	83%	25%	0%	-
SNK-12	0,9	33%	71%	-	100%
SCA-12	2,1	25%	80%	0%	83%
APA-5	-	-	-	-	-
CAB-5019	-	-	-	-	-
EET-48	-	-	-	-	-
EET-400	-	-	-	-	-
ICS-6	-	-	-	-	-
ICS-100	-	-	-	-	-
POUND-12	-	-	-	-	-
SGU-26	-	-	-	-	-
NA-34	-	-	-	-	-
PA-81	-	-	-	-	-
PA-121	-	-	-	-	-
Rizek-1	6,19	-	-	-	-
Rizek-12	8,11	-	-	-	-
Rizek-16	5,07	-	-	-	-
Rizek-36	5,47	-	-	-	-
Rizek-43	7,45	-	-	-	-
Rizek-44	10,29	-	-	-	-
Rizek-61	4,29	-	-	-	-
Rizek-83	7,28	-	-	-	-
Rizek-84	4,56	-	-	-	-
Rizek-100	6,85	-	-	-	-
IML-9	-	-	-	-	-
IML-11	-	-	-	-	-
IML-12	-	-	-	-	-
IML-14	-	-	-	-	-
IML-16	-	-	-	-	-
IML-18	-	-	-	-	-
IML-19	-	-	-	-	-
IML-20	-	-	-	-	-
IML-22	-	-	-	-	-
IML-28	-	-	-	-	-
IML-30	-	-	-	-	-
IML-31	-	-	-	-	-
IML-32	-	-	-	-	-
IML-33	-	-	-	-	-
IML-34	-	-	-	-	-
IML-37	-	-	-	-	-
IML-38	-	-	-	-	-
IML-44	8,97	-	-	-	-

IML-46	-	-	-	-	-
IML-53	10,58	-	-	-	-
IML-54	-	-	-	-	-
IML-55	-	-	-	-	-
IML-65	-	-	-	-	-
IML-76	-	-	-	-	-
IML-89	-	-	-	-	-
IML-92	-	-	-	-	-
IML-117	-	-	-	-	-
ML-1	-	-	-	-	-
ML-3	9	-	-	-	-
ML-4	4	-	100%	-	-
ML-16	4	-	100%	-	-
ML-22	8	-	-	-	-
ML-59	5	-	-	-	-
ML-64	6	0%	-	-	-
ML-66	5	-	100%	-	-
ML-67	5	0%	-	-	-
ML-70	4	-	-	-	-
ML-71	5	-	-	-	-
ML-73	7	100%	-	-	-
ML-75	9	-	-	-	-
ML-102	5,3	0%	-	100%	-
ML-103	5,6	-	100%	-	-
ML-105	7,9	-	-	-	-
ML-106	6,2	0%	0%	-	-
ML-107	5,5	0%	0%	-	-

Annexe 3. Classement des espèces associées suivant le score d'espèce E

Espèces les plus intéressantes pour être associées aux cacaoyers (Score d'espèce $E = \sum_{i=1}^n (P_i * P_{i*E}) > 50$) pour les 4 groupes de co-conception (PSC = groupe de producteurs de la province de San Cristobal, TSC = groupe de techniciens de la province de San Cristobal, PD = groupe de producteurs de la province de Duarte, TD = groupe de techniciens de la province de Duarte).. Plus le score est élevé plus l'espèce présente un intérêt pour être associée aux cacaoyers.

Nom commun	Nom scientifique	PSC	TSC	PD	TD
Musacées	<i>Musa spp.</i>	387	326	322	243
Avocatier	<i>Persea americana</i>	282	325	189	227
Oranger	<i>Citrus aurantium</i>	387	272	71	176
Taro	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	288	180	225	128
Oranger (doux)	<i>Citrus x sinensis</i>	70		272	86
Gingembre	<i>Zingiber officinale</i>	160	110		71
Sapotillier	<i>Pouteria sapote</i>	111	55		98
Cocotier	<i>Cocos nucifera</i>	92		125	50
Mandarinier	<i>Citrus reticulata</i>	243			
Citronnier (vert)	<i>Citrus x latifolia</i>		120	104	
Erythrine	<i>Erythrina poeppigiana</i>				202
Roucou	<i>Bixa orellana</i>		87		100
Igname	<i>Dioscorea alata</i>		119	52	
Gliricide	<i>Gliricidia sepium</i>		175		172
Acajou d'Afrique	<i>Swietenia mahagoni</i>		94		
Pois d'angole	<i>Cajanus cajan</i>				130
Corossolier	<i>Annona muricata</i>		142		86
Acérola	<i>Malpighia emarginata</i>	73			
Fruitier à pain	<i>Artocarpus altilis</i>				60
Papayer	<i>Carica papaya</i>				60
Catalpa	<i>Catalpa longissima</i>			55	
Gmelina	<i>Gmelina arborea</i>				54

Annexe 4. Itinéraire technique élaboré participativement en atelier de co-conception détaillant les temps de travaux (Tps W en jours de travail) et le coût de la main d'œuvre (Coût MO en pesos dominicains RD\$). La dernière ligne présente ces données par hectare, avec le coût converti en US\$.

		Année 1		Année 2		Année 3		Année 4		Année 5	
Composante	Pratique	Tps W	Coût MO	Tps W	Coût MO	Tps W	Coût MO	Tps W	Coût MO	Tps W	Coût MO
Cacaoyer	Plantation	3	1800	-	-	-	-	-	-	-	-
Cacaoyer	Egourmandage	4	2400	4	2400	4	2400	-	-	-	-
Cacaoyer	Taille de formation	1	800	1	800	1	800	-	-	-	-
Cacaoyer	Taille de maintien	-	-	-	-	-	-	2	1600	2	1600
Cacaoyer	Préparation et disposition de poison anti-rats	-	-	-	-	-	-	1,5	900	1,5	900
Cacaoyer	Récolte	-	-	-	-	8	4800	17	10200	26	15600
Avocatier	Plantation	0,2	120	-	-	-	-	-	-	-	-
Avocatier	Taille de formation	0,2	160	0,2	160	-	-	-	-	-	-
Avocatier	Taille de maintien	-	-	-	-	2	1600	2	1600	2	1600
Avocatier	Récolte	-	-	-	-	0,5	300	1	600	1,5	900
Oranger	Plantation	0,2	120	-	-	-	-	-	-	-	-
Oranger	Taille de formation	0,2	160	0,2	160	0,2	160	-	-	-	-
Oranger	Récolte	-	-	-	-	1	600	2	1200	3	1800
Sapotillier	Plantation	0,2	120	-	-	-	-	-	-	-	-
Sapotillier	Taille de formation	0,2	160	0,2	160	-	-	-	-	-	-
Sapotillier	Taille de maintien	-	-	-	-	0,5	400	0,5	400	0,5	400
Sapotillier	Récolte	-	-	-	-	0,5	300	1	600	1,5	900
Mandarinier	Plantation	0,2	120	-	-	-	-	-	-	-	-
Mandarinier	Taille de formation	0,2	160	0,2	160	0,2	160	-	-	-	-
Mandarinier	Récolte	-	-	-	-	0,75	450	1,5	900	2,25	1350
Cocotier	Plantation	0,1	60	-	-	-	-	-	-	-	-
Cocotier	Récolte	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Musacées	Plantation	2	1200	-	-	-	-	-	-	-	-
Musacées	Buttage	1	600	-	-	-	-	-	-	-	-
Musacées	Oeilletonnage	-	-	1	600	1	600	1	600	1	600
Musacées	Récolte	-	-	2	1200	2	1200	2	1200	1,5	900
Taro	Plantation	8	3600	-	-	-	-	-	-	-	-
Taro	Buttage	2	1200	1,8	1080	1,6	960	1,2	720	0,8	480
Taro	Récolte et replantation	-	-	15	9000	12	7200	9	5400	6	3600
Toutes espèces	Coût plants	-	16900	-	-	-	-	-	-	-	-
Toutes espèces	Désherbage (machette)	32	19200	32	19200	12	7200	12	7200	12	7200
Muavaies herbes	Fertilisation (engrais préparé sur l'exploitation)	2	1200	2	1200	2,5	1500	2,5	1500	2,5	1500
TOTAL (jours et RD\$ par prototype(0,25 ha))		56,7	50080	59,6	36120	49,75	30630	56,2	34620	64,05	39330
TOTAL (jours et US\$/ha)		226,8	4006,4	238,4	2889,6	199	2450,4	224,8	2769,6	256,2	3146,4

Suite Annexe 4.

Composante	Pratique	Tps W	Coût MO	Tps W	Coût MO	Tps W	Coût MO	Tps W	Coût MO	Tps W	Coût MO
Cacaoyer	Plantation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cacaoyer	Egourmandage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cacaoyer	Taille de formation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cacaoyer	Taille de maintien	2	1600	2	1600	2	1600	2	1600	2	1600
Cacaoyer	Préparation et disposition de poison anti-rats	1,5	900	1,5	900	1,5	900	1,5	900	1,5	900
Cacaoyer	Récolte	35	21000	44	26400	44	26400	44	26400	44	26400
Avocatier	Plantation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Avocatier	Taille de formation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Avocatier	Taille de maintien	2	1600	2	1600	2	1600	2	1600	1,5	1200
Avocatier	Récolte	2	1200	2,5	1500	3	1800	3,5	2100	4	2400
Oranger	Plantation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Oranger	Taille de formation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Oranger	Récolte	4	2400	5	3000	6	3600	7	4200	8	4800
Sapotillier	Plantation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sapotillier	Taille de formation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sapotillier	Taille de maintien	0,5	400	0,5	400	0,5	400	0,5	400	0,5	400
Sapotillier	Récolte	2	1200	2,5	1500	3	1800	3,5	2100	4	2400
Mandarinier	Plantation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mandarinier	Taille de formation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mandarinier	Récolte	3	1800	3,75	2250	4,5	2700	5,25	3150	6	3600
Cocotier	Plantation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cocotier	Récolte	0,1	100	0,2	200	0,3	300	0,4	400	0,5	500
Musacées	Plantation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Musacées	Buttage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Musacées	Oeilletonnage	1	600	1	600	1	600	1	600	1	600
Musacées	Récolte	1,5	900	1	600	1	600	1	600	1	600
Taro	Plantation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Taro	Buttage	0,4	240	-	-	-	-	-	-	-	-
Taro	Récolte et replantation	3	1800	-	-	-	-	-	-	-	-
Toutes espèces	Désherbage (machette)	12	7200	6	3600	6	3600	6	3600	6	3600
Muavaies herbes	Fertilisation (engrais préparé sur l'exploitation)	2,5	1500	3	1800	3	1800	3	1800	3	1800
TOTAL (jours et RD\$ par prototype(0,25 ha))		72.5	44400	74,95	45950	77,8	47700	80,65	49450	83	50800
TOTAL (jours et US\$/ha)		290	3555,2	299,8	3676	311,2	3816	322,6	3956	332	4064

Annexe 5. Photos prises lors de l'Etape 1 de « Détermination du cadre conceptuel de la co-conception » dans la Province de Duarte.



Travail en petit groupes pour schématiser un SAF et les caractéristiques souhaitées et celles non souhaitées.



Sortie en parcelles de SAF pour affiner la description des états souhaités et les fonctions qui y sont associées.



Présentation de ces caractéristiques aux autres participants et discussions.



Annexe 6. Quatre photos prise lors de l'Etape 2 de « Formalisation technique des prototypes co-conçus » dans la Province de San Cristobal.



Méthode de Sheil pour hiérarchiser les critères de sélection des cacaoyers.



Méthode de Sheil pour hiérarchiser les critères de sélection des cultures associées.



Atelier de schématisation du prototype pour déterminer la disposition spatiale des espèces associées.



Elaboration de l'itinéraire technique du prototype.

Annexe 7. Photos prises dans les dispositifs expérimentaux, installées sur 34 parcelles de producteurs, récoltés tous les 15 jours.



Récolte des cabosses de cacao ou comme ici d'oranges douces avec un émondoir, outil qui se compose d'une lame affutée placée à l'extrémité d'une longue perche (de 4 à 7m).



Arbre numéro 35 de l'un des 34 dispositifs dont l'une des cabosses visibles sur la photo est affectée par la pourriture brune (*Phytophthora palmivora*).



Récolte des cabosses récoltées sur l'un des dispositifs par les quatre stagiaires ayant grandement contribué à la collecte de données utilisées dans le Chapitre IV.

Annexe 8. Photos du processus d'installation des prototypes co-conçus.



Pépinière de Mata larga de notre partenaire IDIAF (Institut Dominicain de Recherche agricole et Forestière) où sont produits les plants de cacaoyers, greffés, qui ont été plantés dans les prototypes.



Transport des plants de cacaoyers, parfois à dos de mule ou à main nues, en fonction des conditions d'accès aux parcelles où les prototypes ont été mis en place.



Plantation d'un jeune cacaoyer dans un prototype avec son étiquette indiquant la variété dont il s'agit.

Apports des sciences participatives et des sciences agronomiques à la conception de systèmes agroforestiers complexes innovants

Résumé : La diversification spécifique des systèmes de culture est souvent associée à des progrès en matière de productivité globale, de production de services écosystémiques et de durabilité. Mais il convient d'évaluer dans quelle mesure cette hypothèse est vérifiée selon le contexte, la filière et la configuration des systèmes de culture. A partir de ce diagnostic, on peut envisager la conception de modalités de diversification qui répondent aux attentes des agriculteurs et des acteurs concernés.

Cette démarche a été développée en République Dominicaine sur des systèmes agroforestiers (SAF) où des cacaoyers sont associés avec d'autres cultures, dont des espèces ligneuses. Environ 40 000 producteurs et leurs familles dépendent de la production de ces SAF pour vivre. Des études récentes ont montré la fragilité du secteur cacaoyer dominicain, qui n'intéresse plus les jeunes générations, notamment à cause d'un manque de rentabilité économique des SAF. L'enjeu pour le secteur est donc que des transformations des SAF et de leur gestion aient lieu pour rendre la cacaoculture économiquement attractive.

Pour répondre à cet objectif, nous avons entrepris la conception de SAF innovants via (i) une démarche participative menée avec des acteurs locaux du secteur cacaoyer, et (ii) une démarche assistée par analyses statistiques. Pour la première, nous avons élaboré une méthode de co-conception s'articulant autour d'ateliers organisés avec quatre groupes dans deux régions différentes. Cette méthode permet d'aborder en collectif et de façon systémique la complexité des SAF pour mettre au point des innovations intégrées dans des prototypes (ou SAF innovants). La conception assistée par analyses statistiques se base sur un diagnostic agroéconomique partiel des SAF. Ce diagnostic a été réalisé via deux approches, mixte et *in situ*, pour analyser la diversité des SAF et de leurs performances respectivement à l'échelle d'un territoire et à l'échelle parcellaire. Avec l'approche mixte nous décrivons les SAF dominicains au travers d'une typologie et analysons les performances agroéconomiques de chaque type. Avec l'approche *in situ*, nous analysons le fonctionnement des SAF à l'échelle de la parcelle, mais aussi à l'échelle de l'individu en évaluant la productivité des cacaoyers en fonction des espèces cultivées associées dans son voisinage direct. Cette analyse débouche sur l'identification de règles d'agencement spatial qui ont permis de concevoir deux prototypes.

Les deux approches de conception et leurs résultats respectifs ont été confrontés pour identifier les avantages de chacune et leurs complémentarités. Agriculteurs et scientifiques ont des grilles de lecture différentes du fonctionnement des SAF, et associer l'approche de conception par modèles statistiques à la conception participative ne pourrait être que bénéfique. Cette hybridation des savoirs permettrait sans aucun doute d'améliorer la pertinence des prototypes, avec une probabilité plus forte d'atteindre les objectifs économiques fixés.

Mots clés : Système agroforestier, Conception participative, Rendement cacao, Biodiversité cultivée, Densité de plantation, Disposition spatiale

Contribution of participatory and agronomic sciences for designing innovative complex agroforestry systems

Abstract: The specific diversification of cropping systems is often associated with progress in overall productivity, provision of ecosystem services and sustainability. But it is appropriate to assess the extent to which this hypothesis is verified according to the context, the supply chain and the configuration of cropping systems. On the basis of this diagnosis, it is possible to consider the design of diversification modalities that meet the expectations of farmers and stakeholders.

This approach has been developed in the Dominican Republic on agroforestry systems (SAF) where cocoa trees are associated with other crops, including woody species. About 40,000 producers and their families depend on the production of these SAF for their livelihood. Recent studies have shown the fragility of the Dominican cocoa sector, which no longer interests the younger generations, particularly because of a lack of economic profitability of the SAF. The challenge for the sector is therefore to transform SAF and their management to make cocoa farming economically attractive.

To meet this objective, we have undertaken the design of innovative SAFs through (i) a participatory approach conducted with local cocoa sector stakeholders, and (ii) an approach assisted by statistical analysis. For the first, we developed a co-design method based on workshops organized with four groups in two different regions. This method allows the complexity of SAF to be addressed collectively and systemically in order to develop innovations integrated into prototypes (or innovative SAF). Design assisted by statistical analysis is based on a partial agro-economic diagnosis of FAS. This diagnosis was carried out using two approaches, mixed and *in situ*, to analyse the diversity of FAS and their performance at the scale of a territory and at the plot level respectively. With the mixed approach we describe Dominican SAF through a typology and analyse the agro-economic performance of each type. With the *in situ* approach, we analyze the functioning of SAF at the plot scale, but also at the individual level by assessing cocoa tree productivity according to the associated cultivated species in its direct vicinity. This analysis leads to the identification of spatial layout rules that have allowed the design of two prototypes.

The two design approaches and their respective results were compared to identify the benefits of each and their complementarities. Farmers and scientists have different interpretations of how SAF are functioning, and combining the statistical model design approach with participatory design could only be beneficial. This hybridization of knowledge would undoubtedly improve the relevance of prototypes, with a higher probability of achieving the economic objectives set.

Keywords: Agroforestry system, Participatory designing, Cocoa yield, Crop biodiversity, Planting density, Spatial arrangement